

Федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение  
высшего образования  
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Политехнический институт  
институт  
Теплотехника и гидрогазодинамика  
кафедра

УТВЕРЖДАЮ  
Заведующий кафедрой  
В.А. Кулагин  
подпись                      инициалы, фамилия  
«\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2018 г.

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Исследование реологических свойств жидкости

тема  
13.04.01 Теплоэнергетика и теплотехника  
код и наименование направления  
13.04.01.01 Энергетика теплотехнологий  
код и наименование магистерской программы

Научный руководитель \_\_\_\_\_ доцент, канд. физ-мат. наук Е.Б. Истягина  
подпись, дата                      должность, ученая степень                      инициалы, фамилия

Выпускник \_\_\_\_\_ О.В. Ананин  
подпись, дата                      инициалы, фамилия

Рецензент \_\_\_\_\_ начальник РТС-3 М.Л. Дорошкевич  
подпись, дата                      должность, ученая степень                      инициалы, фамилия

Красноярск 2018

## РЕФЕРАТ

Магистерская диссертация на тему «Исследование реологических свойств жидкости» содержит 85 страниц текстового документа, 11 рисунков, 52 использованных источника.

Кавитация, жидкие теплоносители, экспериментальная установка.

Объект исследования – водопроводная вода.

Целью моей работы является адаптация экспериментальной лабораторной установки к исследованию реологических свойств технологических жидкостей.

В работе произведена гидродинамическая обработка воды в режиме кавитации, произведены измерения физических свойств воды. Определены графические зависимости физических свойств водопроводной воды от времени обработки кавитацией. Проведено сравнение характеристик свойств водопроводной воды при разных расходах через перекачивающий насос.

Полученные результаты могут быть использованы для полезного применения физических свойств воды с помощью режимов кавитации. А это в свою очередь может способствовать более эффективному использованию активированной воды в различных отраслях промышленности, а также расширить границы использования насосного оборудования, что позволит увеличить спектр технологических задач, возникающих при эксплуатации данного оборудования, уменьшить вероятность отказов за счет исключения областей, в которых насос работает неудовлетворительно. Использование полученных данных может облегчить и улучшить работу многих отраслей производства от электростанций до нефтеперерабатывающей промышленности.

Задачей моей работы является отладка существующей экспериментальной установки с целью дальнейшего её использования для решения прикладных задач.

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
1 Кавитационные явления.....	6
1.1 Физические основы кавитации.....	6
1.2 Негативные последствия кавитации.....	7
1.3 Предотвращение последствий.....	8
1.4 Практическое применение использование кавитационных явлений.....	9
1.5 Стабилизация расхода жидкости.....	13
2 Экспериментальная установка.....	15
2.1 Преобразование экспериментальной установки.....	18
3 Результаты проведенных опытов.....	20
3.1 Проверка корректности работы установки.....	20
4 Опреснение жидкости.....	22
4.1 Гидроволновой метод.....	24
5 Теории кавитационного разрушения и диспергирования твердых тел.....	34
5.1 Факторы, влияющие на интенсификацию процесса диспергирования и кавитационного разрушения.....	56
5.1.1 Газовая фаза.....	57
5.1.2 Коэффициент поверхностного натяжения, давление насыщенных паров и вязкость жидкости.....	57
5.1.3 Температура.....	58
5.1.4 Интенсивность звукового поля.....	62
5.1.5 Статического давление.....	63
5.2 Актуальность проблемы сверхтонкого диспергирования. Способ повышения эффективности ультразвукового диспергирования.....	66
5.3 Разработка сплавов с повышенной кавитационной износостойкостью.....	71
5.3.1 Актуальность проблемы.....	71

5.3.2 Кавитационная эрозия и факторы ее обуславливающие. Роль структуры сплава.....	73
5.3.3 Алюминиевые бронзы – кавитационно-стойкий материал.....	75
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	80
Список использованных источников.....	81

## ВВЕДЕНИЕ

Реология - это учение о текучести материалов. Текучесть жидкости измеряется вязкостью, текучесть твердых веществ - ползучестью (крипом) и вязкоэластичностью.

Реологические свойства влияют на режимы работы технологического оборудования, надёжность работы.

Экспериментально изучать реологические свойства жидкости эффективнее с помощью явления кавитации.

Теоретическое и экспериментальное изучение кавитации в настоящее время весьма актуально. Интерес к этим исследованиям в течение долгого времени был обусловлен, главным образом, потребностями свести к минимуму вредные последствия явления кавитации, например, в насосных установках для устранения разрушения лопастей насоса, гидротурбин.

Позже были обнаружены положительные воздействия кавитации (например, сверхкавитационные торпеды, в военной промышленности). Положительное влияние кавитации используется для очистки различных поверхностей и жидких субстанций, таких как топливо.

Кавитация обширно применяется в медицине, судостроении. Большую роль кавитация занимает в опреснительных установках, которые необходимы на судах, выходящих в море либо океан, а также в регионах, где ощущается нехватка пресной воды.

Несмотря на обширное применение кавитации в различных областях, это явление ещё не полностью изучено. Экспериментальная установка, представленная в данной работе, позволяет взглянуть на явление кавитации более широко, изучить полезные свойства кавитации, обозначить перспективы для дальнейшего использования кавитационных явлений.

# **1 Кавитационные явления**

## **1.1 Физические основы кавитации**

Кавитация — процесс образования и последующего схлопывания пузырьков воздуха (пара) в потоке жидкости, сопровождающийся шумом и гидравлическими ударами, образование в жидкости полостей (кавитационных пузырьков, или пустот), которые могут содержать разреженный пар. Кавитация возникает в результате местного понижения давления в жидкости ниже давления насыщения, которое может происходить либо при увеличении её скорости (гидродинамическая кавитация), либо при прохождении акустической волны большой интенсивности во время полупериода разрежения (акустическая кавитация), существуют и другие причины возникновения эффекта. Перемещаясь с потоком в область с более высоким давлением или во время полупериода сжатия, кавитационный пузырёк схлопывается, излучая при этом ударную волну. В своей основе кавитация имеет тот же механизм действия, что и ударная волна в воздухе, возникающая в момент преодоления твердым телом звукового барьера.

Явление кавитации носит локальный характер и возникает только там, где есть условия. Перемещаться в среде возникновения не может. Кавитация разрушает поверхность гребных винтов, гидротурбин, акустических излучателей, деталей амортизаторов, гидромуфт и др. Кавитация также приносит пользу — её применяют в промышленности, медицине, военной технике и других смежных областях.

Согласно определению Кристофера Бреннена: «Когда жидкость подвергается давлению ниже порогового (напряжению растяжения), тогда целостность её потока нарушается, и образуются парообразные полости. Это явление называется кавитацией. Когда местное давление жидкости в некоторой точке падает ниже величины, соответствующей давлению насыщения при данной окружающей температуре, тогда жидкость переходит

в другое состояние, образуя, в основном, фазовые пустоты, которые называются кавитационными пузырями. Возможно и другое образование кавитационных пузырей путём местной подачи энергии. Это может быть достигнуто фокусировкой интенсивного лазерного импульса (оптическая кавитация) или искрой электрического разряда».

Во многих источниках физика этого явления объясняется следующим образом. Физический процесс кавитации близок процессу закипания жидкости. Основное различие между ними заключено в том, что при закипании изменение фазового состояния жидкости происходит при среднем по объёму жидкости давлении, равном давлению насыщенного пара, тогда как при кавитации среднее давление жидкости выше давления насыщенного пара, а падение давления носит локальный характер.

Однако более поздние исследования показали, что ведущую роль в образовании пузырьков при кавитации играют газы, выделяющиеся внутри образующихся пузырьков. Эти газы всегда содержатся в жидкости, и при местном снижении давления начинают интенсивно выделяться внутри указанных пузырьков.

Поскольку под воздействием переменного местного давления жидкости пузырьки могут резко сжиматься и расширяться, то температура газа внутри пузырьков колеблется в широких пределах, и может достигать нескольких сот градусов по Цельсию. Имеются расчётные данные, что температура внутри пузырьков может достигать 1500 °С. Следует также учитывать, что в растворённых в жидкости газах содержится больше кислорода в процентном отношении, чем в воздухе, и поэтому газы в пузырьках при кавитации химически более агрессивны, чем атмосферный воздух — вызывают в итоге окисление (вступление в реакцию) многих обычно инертных материалов.

## **1.2 Негативные последствия кавитации**

Химическая агрессивность газов в пузырьках, имеющих к тому же высокую температуру, вызывает эрозию материалов, с которыми соприкасается жидкость, в которой развивается кавитация. Эта эрозия и составляет один из факторов вредного воздействия кавитации. Второй фактор обусловлен большими забросами давления, возникающими при схлопывании пузырьков и воздействующими на поверхности указанных материалов.

Кавитационная эрозия металлов вызывает разрушение гребных винтов судов, рабочих органов насосов, гидротурбин и т. п., кавитация также является причиной шума, вибрации и снижения эффективности работы гидроагрегатов.

Схлопывание кавитационных пузырей приводит к тому, что энергия окружающей жидкости сосредотачивается в очень небольших объёмах. Тем самым, образуются места повышенной температуры и возникают ударные волны, которые являются источниками шума и приводят к эрозии металла. Шум, создаваемый кавитацией, является особой проблемой на подводных лодках, так как снижает их скрытность. Эксперименты показали, что вредному, разрушительному воздействию кавитации подвергаются даже химически инертные к кислороду вещества (золото, стекло и др.), хотя и намного более медленному. Это доказывает, что помимо фактора химической агрессивности газов, находящихся в пузырьках, важным является также фактор забросов давления, возникающих при схлопывании пузырьков. Кавитация ведёт к большому износу рабочих органов и может значительно сократить срок службы винта и насоса. В метрологии, при использовании ультразвуковых расходомеров, кавитационные пузыри модулируют волны в широком спектре, в том числе и на частотах, излучаемых расходомером, что приводит к искажению его показаний.

### **1.3 Предотвращение последствий**



Наилучшим методом предотвращения вредных последствий кавитации для деталей машин считается изменение их конструкции таким образом, чтобы предотвратить образование полостей либо предотвратить разрушение этих полостей возле поверхности детали. При невозможности изменения конструкции могут применяться защитные покрытия, например, газотермическое напыление сплавов на основе кобальта.

В системах гидропривода часто используют системы подпитки. Они, упрощённо говоря, представляют собой дополнительный насос, жидкость от которого начинает поступать через специальный клапан в гидросистему, когда в последней давление падает ниже допустимого значения. Если давление в гидросистеме не опускается ниже допустимого, жидкость от дополнительного насоса идёт на слив в бак. Системы подпитки установлены, например, во многих экскаваторах.

#### **1.4 Практическое использование кавитационных явлений**

Хотя кавитация нежелательна во многих случаях, есть исключения. Например, сверхкавитационные торпеды, используемые военными, обволакиваются в большие кавитационные пузыри. Существенно уменьшая контакт с водой, эти торпеды могут передвигаться значительно быстрее, чем обыкновенные торпеды. Так сверхкавитационная торпеда «Шквал», в зависимости от плотности водной среды, развивает скорость до 370 км/ч. Кавитация используется при ультразвуковой очистке поверхностей твёрдых тел. Специальные устройства создают кавитацию, используя звуковые волны в жидкости. Кавитационные пузыри, схлопываясь, порождают ударные волны, которые разрушают частицы загрязнений или отделяют их от поверхности. Таким образом, снижается потребность в опасных и вредных для здоровья чистящих веществах во многих промышленных и коммерческих процессах, где требуется очистка как этап производства.

В промышленности кавитация часто используется для гомогенизации (смешивания) и отсадки взвешенных частиц в коллоидном жидкостном составе, например, смеси красок или молоке. Многие промышленные смесители основаны на этом принципе. Обычно это достигается благодаря конструкции гидротурбин или путём пропускания смеси через кольцевидное отверстие, которое имеет узкий вход и значительно больший по размеру выход: вынужденное уменьшение давления приводит к кавитации, поскольку жидкость стремится в сторону большего объёма. Этот метод может управляться гидравлическими устройствами, которые контролируют размер входного отверстия, что позволяет регулировать процесс работы в различных средах. Внешняя сторона смесительных клапанов, по которой кавитационные пузыри перемещаются в противоположную сторону, чтобы вызвать имплозию (внутренний взрыв), подвергается огромному давлению и часто выполняется из сверхпрочных или жестких материалов, например, из нержавеющей стали, титана или даже поликристаллического алмаза (PCD).

Кавитацию используют для обработки топлива. Во время обработки топливо дополнительно очищается (при проведении химического анализа сразу обнаруживается существенное уменьшение количества фактических смол), и перераспределяется соотношение фракций (в сторону более лёгких). Эти изменения, если топливо сразу поступает к потребителю, повышают его качество и калорийность, как следствие, достигается более полное сгорание и уменьшение массовой доли загрязняющих веществ. Сейчас до сих пор проходят исследования по влиянию кавитации на топливо. Их проводят частные компании и институты, например, Российский государственный университет нефти и газа им. И. М. Губкина.

Также были разработаны кавитационные водные устройства очистки, в которых граничные условия кавитации могут уничтожить загрязняющие вещества и органические молекулы. Спектральный анализ света, испускаемого в результате сонохимической реакции, показывает химические

и плазменные базовые механизмы энергетической передачи. Свет, испускаемый кавитационными пузырями, называется сонолюминесценцией.

Кавитационные процессы имеют высокую разрушительную силу, которую используют для дробления твёрдых веществ, которые находятся в жидкости. Одним из применений таких процессов является измельчение твёрдых включений в тяжёлые топлива, что используется для обработки котельного топлива с целью увеличения калорийности его горения.

Кавитационные устройства снижают вязкость углеводородного топлива, что позволяет снизить необходимый нагрев и увеличить дисперсность распыления топлива.

Кавитационные устройства используются для создания водно-мазутных и водно-топливных эмульсий и смесей, которые часто используются для повышения эффективности горения или утилизации обводнённых видов топлива.

### *Лопастные насосы и винты судов*

В местах контакта жидкости с быстро движущимися твёрдыми объектами (рабочие органы насосов, турбин, гребные винты судов, подводные крылья и т. д.) происходит локальное изменение давления. Если давление в какой-то точке падает ниже давления насыщенного пара, происходит нарушение целостности среды. Или, проще говоря, жидкость закипает. Затем, когда жидкость попадает в область с более высоким давлением, происходит «схлопывание» пузырьков пара, что сопровождается шумом, а также появлением микроскопических областей с очень высоким давлением (при соударении стенок пузырьков). Это приводит к разрушению поверхности твёрдых объектов. Их как бы «разъедает». Если зона пониженного давления оказывается достаточно обширной, возникает кавитационная каверна — полость, заполненная паром. В результате нормальная работа лопастей нарушается и возможен даже полный срыв работы насоса. Любопытно, но есть

примеры, когда кавитационная каверна специально закладывается при расчёте насоса. В тех случаях, когда избежать кавитации невозможно, такое решение позволяет избежать разрушительного влияния кавитации на рабочие органы насоса. Режим, при котором наблюдается устойчивая кавитационная каверна, называют «режимом суперкавитации».

#### *Лопастные насосы. Кавитация на стороне всасывания*

Как правило, зона кавитации наблюдается вблизи зоны всасывания, где жидкость встречается с лопастями насоса. Вероятность возникновения кавитации тем выше,

- чем ниже давление на входе в насос;
- чем выше скорость движения рабочих органов относительно жидкости;
- чем более неравномерно обтекание жидкостью твёрдого тела (высокий угол атаки лопасти, наличие изломов, неровностей поверхности и т. п.)

#### *Центробежные насосы. Кавитация в уплотнении рабочего колеса*

У классических центробежных насосов часть жидкости из области высокого давления проходит через щель между рабочим колесом и корпусом насоса в зону низкого давления. Когда насос работает с существенным отклонением от расчётного режима в сторону повышения давления нагнетания, расход утечек через уплотнение между рабочим колесом и корпусом возрастает (из-за увеличения перепада давления между полостями всасывания и нагнетания). Из-за высокой скорости жидкости в уплотнении возможно появление кавитационных явлений, что может привести к разрушению рабочего колеса и корпуса насоса. Как правило, в бытовых и промышленных случаях режим кавитации в рабочем колесе насоса возможен при резком падении давления в системе отопления или водоснабжения: например, при разрыве трубопровода, калорифера или радиатора. При резком

падении давления в зоне рабочего колеса насоса образуется вакуум, вода при низком давлении начинает вскипать. При этом напор резко падает. Режим кавитации приводит к эрозии рабочего колеса насоса, и насос выходит из строя.

### 1.5 Стабилизация расхода жидкости

Эффект кавитации часто используют для практических целей. В частности, он используется в устройствах для стабилизации расхода жидкости. Устройство (рисунок 1а) состоит из дроссельной шайбы 1, измеряющей расход жидкости, и осесимметричной дроссельной иглы 2, служащей для введения устройства в кавитационный режим работы.

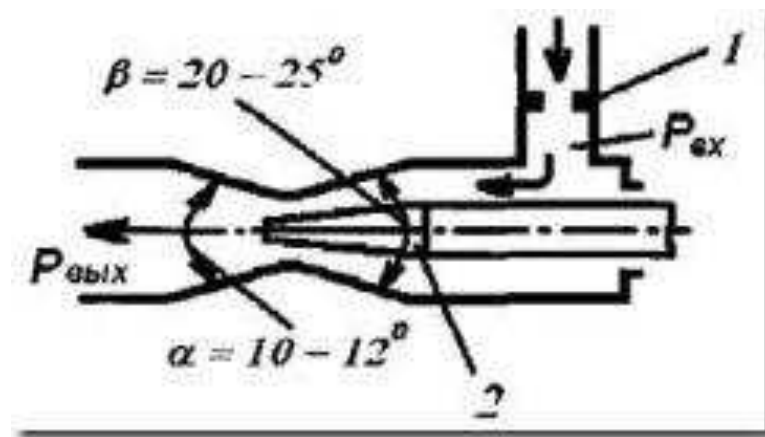


Рисунок 1,а - Принципиальная схема кавитационного устройства для стабилизации расхода жидкости

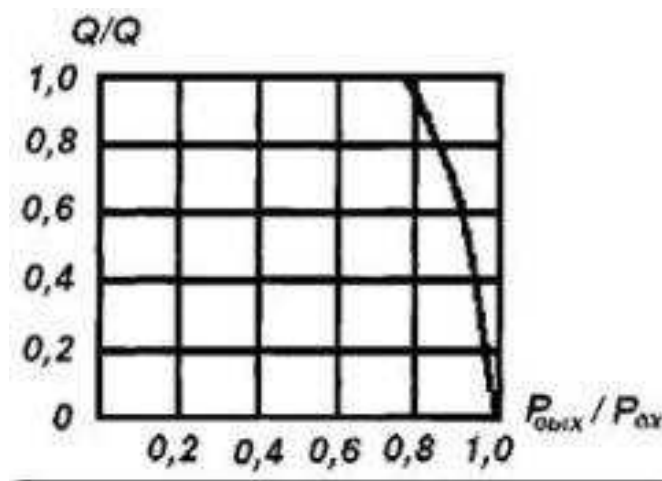


Рисунок 1,б - Кривая, характеризующая стабильность расхода через кавитационное устройство

При понижении давления  $P_{\text{вых}}$  на выходе, в данном случае из сопла Вентури, при постоянном давлении  $p_{\text{вх}}$  на входе в него скорость потока жидкости будет повышаться, в соответствии с чем давление в суженном сечении сопла будет понижаться. После достижения этого давления до величины, соответствующей началу кавитации жидкости, последняя вскипает. Поскольку сопротивление сопла после этого будет увеличиваться пропорционально интенсивности кавитации, которая, в свою очередь, будет повышаться с увеличением перепада давления, расход через сопло после возникновения кавитации стабилизируется, сохраняясь постоянным независимо от дальнейшего снятия давления на выходе из сопла. При уменьшении этого давления будет лишь расширяться зона кавитации по диффузорной части, начиная от суженного сечения.

Подобные кавитационные устройства (сопла) используют для стабилизации расхода при колебаниях давления на выходе (при колебаниях нагрузки). Они обеспечивают регулирование расхода жидкости в большом диапазоне ( $\geq 10$ ) при одновременной стабилизации расхода на каждом режиме.

На рисунке 1, б показаны кривые зависимости регулируемого расхода  $Q$  жидкости от перепада давления на сопла при различных значениях (от 10 до 30 кГ/см<sup>2</sup>) давления  $p_{\text{вх}}$  на входе и давления  $P_{\text{вых}}$  выходе, изменяющегося от 0

до входного ( $30 \text{ кг/см}^2$ ). Измерения проведены при расходе жидкости от 500 до  $40\,000 \text{ см}^3/\text{сек}$  при давлениях  $P_{\text{вх}} = 10; 20; 25$  и  $30 \text{ кг/см}^2$ .

Из графика следует, что расход жидкости сохранялся в постоянном (коэффициент расхода  $\mu$  изменялся от 0,96 до 0,97) в широком диапазоне режимов. Нарушение стабилизированного расхода происходит практически при значениях критического давления на выходе  $P_{\text{вых}} \approx P_{\text{вх}}$ , где  $P_{\text{вх}}$  — давление потока на входе в сопло.

Следует отметить, что заметного кавитационного разрушения поверхностей деталей при этом не происходит.

Приведенные примеры отражают только часть возможных случаев использования кавитации, свидетельствуя о необходимости теоретического и экспериментального исследования кавитационных явлений с целью их практического применения.

## 2 Экспериментальная установка

Для экспериментального исследования явлений кавитации в данной работе используется гидродинамический стенд. Установка представляет собой замкнутый гидродинамический контур (рисунок 2).

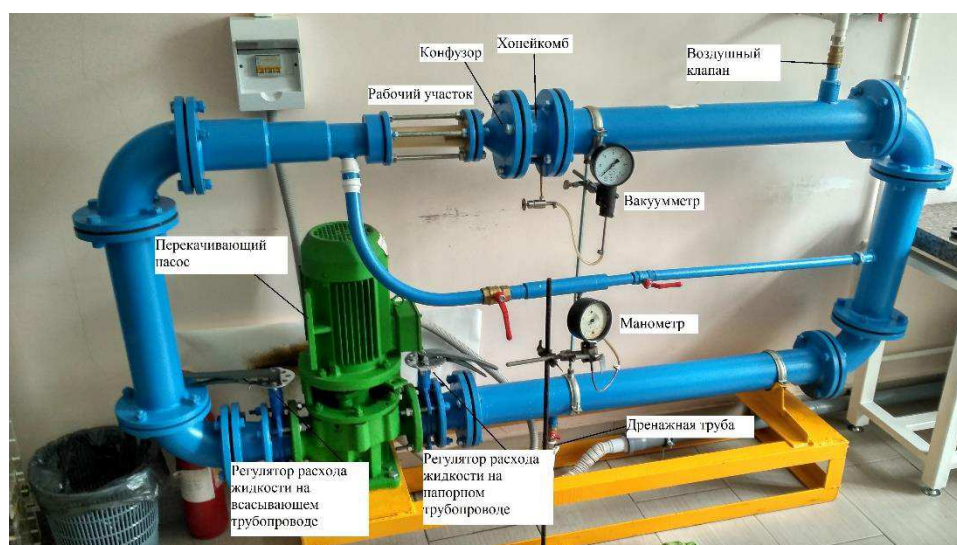


Рисунок 2 - Экспериментальная установка

Система заполняется жидкостью, в данном случае водопроводной водой. На перекачивающем насосе выбирается нужный расход воды. При помощи автоматического выключателя запускается электродвигатель насоса, который перекачивает жидкость в контуре.

Центробежный насос — один из двух типов динамических лопастных насосов, перемещение рабочего тела в котором происходит непрерывным потоком за счёт взаимодействия этого потока с подвижными вращающимися лопастями ротора и неподвижными лопастями корпуса. При этом переносное движение рабочего тела происходит за счёт центробежной силы и протекает в радиальном направлении, то есть перпендикулярно оси вращения ротора.

Такие насосы одинаково применимы как для жидкостей, так и для газов, при этом насосы для перекачивания газов обычно называют центробежными компрессорами или центробежными вентиляторами.

Жидкость, пройдя по трубопроводам и поворотным коленам контура, попадает в хонейкомб (рисунок 3).



Рисунок 3 - Структура устройства хонейкомба

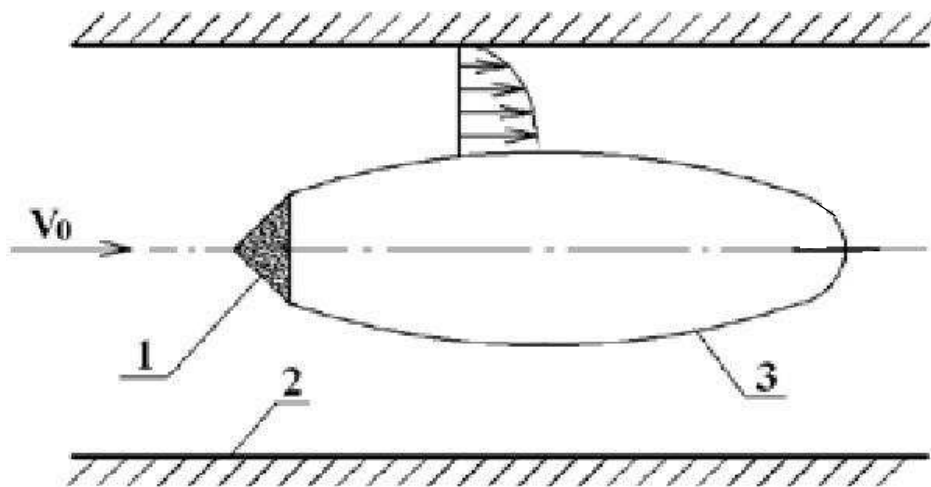
Хонейкомб представляет из себя множество труб меньше диаметра в одном трубопроводе, подобно пчелиным сотам. Хонейкомб служит для



исключения завихрений жидкости, тем самым создавая ламинарный режим течения, который нужен для чистоты эксперимента.

Далее рабочая жидкость попадает в конфузор. Конфузор – это участок проточного канала в виде суживающейся трубы обычно круглого или прямоугольного сечения. В случае, когда в конфузор поступает поток жидкости или газа со скоростью, меньшей местной скорости звука, давление при переходе от широкого входного к узкому выходному сечению падает, а скорость и, следовательно, кинетическая энергия потока возрастают. При дозвуковых скоростях течения эта конструкция работает как сопло. Если скорость течения на входе в конфузор превышает местную скорость звука, в конфузоре происходит торможение потока, которое может приводить к образованию ударных волн.

После конфузора жидкость попадает в рабочий участок, в котором находится кавитатор с определенным углом раскрытия (рисунок 4) - труба из органического стекла для возможного наблюдения за экспериментом.



1 – кавитатор; 2 – труба круглого сечения; 3 – суперкаверна  
Рисунок 4 - Принципиальная схема суперкавитационного испарения

Пройдя через рабочий участок, вода снова через всасывающий трубопровод попадает в перекачивающий насос, замыкающий гидродинамический контур.

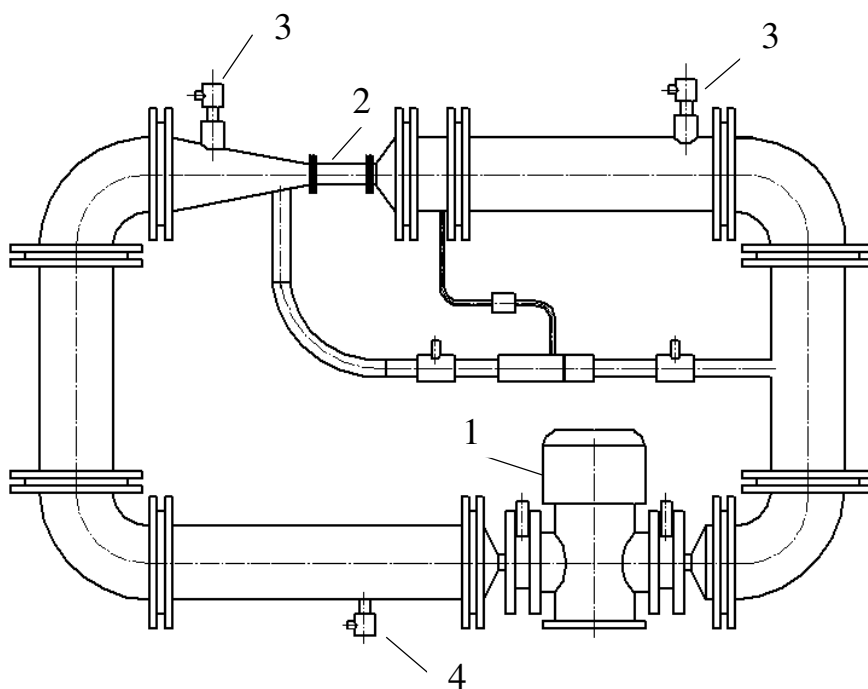
В изначально представленном варианте для снятия показаний присутствовали такие приборы как вакуумметр, для фиксирования явления кавитации в кавитаторе и манометр для отслеживания давления в рабочем контуре.

Дренажная труба предназначена для опустошения замкнутого контура после окончания проведения эксперимента.

## 2.1 Преобразование экспериментальной установки

В ходе проведения экспериментов было выявлено, что в контуре оставалось некоторое количество воздуха из-за неполного заполнения установки водой и недостатка приборов для снятия показаний. Появилась необходимость в проведении доработки экспериментальной установки.

Для удаления воздуха был установлен дополнительный воздушный клапан, расположенный после кавитатора.



1 – перекачивающий насос, 2 – кавитатор, 3 – воздушные клапана, 4 – дренажная труба

Рисунок 5 - Экспериментальная установка

Для увеличения диапазона измерения вакуума и повышения достоверности полученных результатов, был установлен новый вакуумметр, с большим диапазоном измерения разрежения.

Контроль измерения температуры осуществлялся термопарой, размещенной на внутренней стороне трубы и пирометра – на внешней.

Для снятия показаний температуры был установлен пирометр. Пирометр — прибор для бесконтактного измерения температуры тел. Принцип действия основан на измерении мощности теплового излучения объекта измерения преимущественно в диапазонах инфракрасного излучения и видимого света. Пирометры применяют для дистанционного определения температуры объектов в промышленности, быту, сфере ЖКХ, на предприятиях, где большое значение приобретает контроль температур на различных технологических этапах производства (сталелитейная промышленность, нефтеперерабатывающая отрасль). Пирометры могут выступать в роли средства безопасного дистанционного измерения температур раскаленных объектов, что делает их незаменимыми для обеспечения должного контроля в случаях, когда физическое взаимодействие с контролируемым объектом невозможно из-за высоких температур. Их можно применять в качестве теплолокаторов (усовершенствованные модели), для определения областей критических температур в различных производственных сферах.

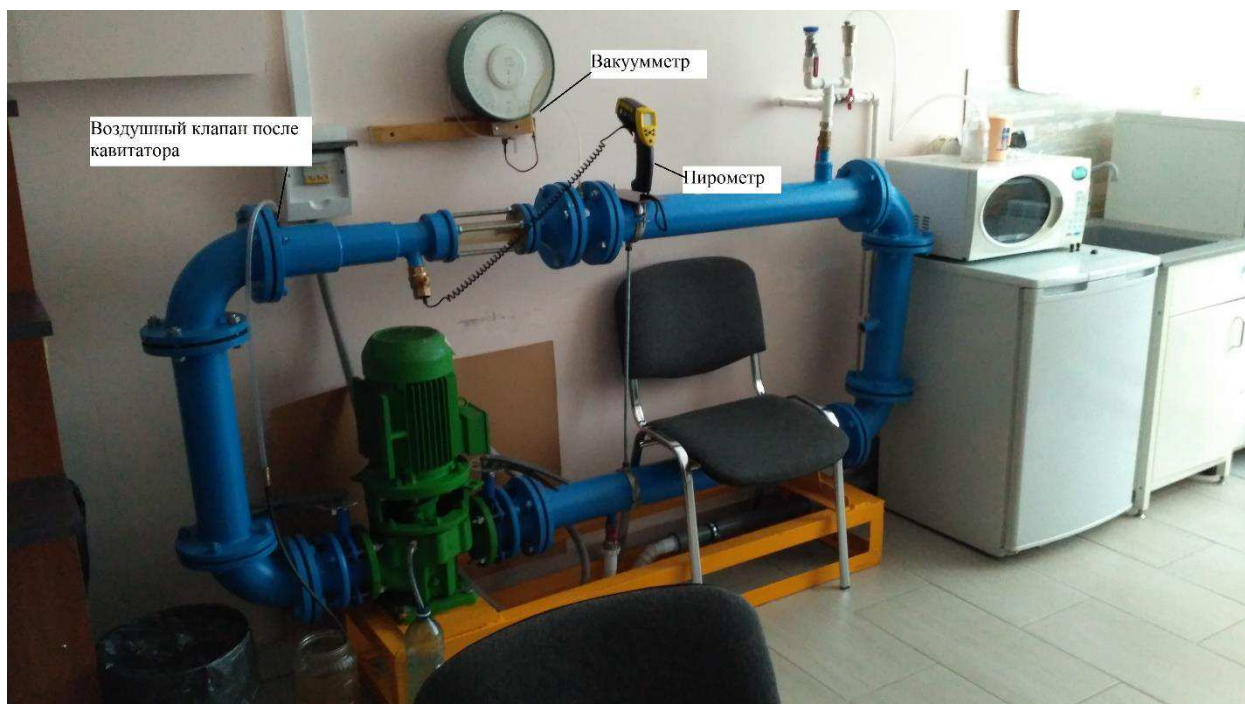


Рисунок 6 - Общий вид экспериментальной установки после проведенных преобразований

Результаты замеров показали, что отличия температуры на внешней и внутренней поверхности трубы незначительны, и контроль за температурой можно проводить по пирометру на внешней поверхности, что существенно упрощает процесс измерения температуры на данной установке.

### **3 Результаты проведенных опытов**

#### **3.1 Проверка корректности работы установки**

Опыты проводились при разных выбранных расходах жидкости через перекачивающий насос, в ходе проведения опытов измерялись температура и давление разряжения внутри рабочего контура с течением времени.

Результаты проведенных опытов представлены на рисунках 7, 8 и 9.

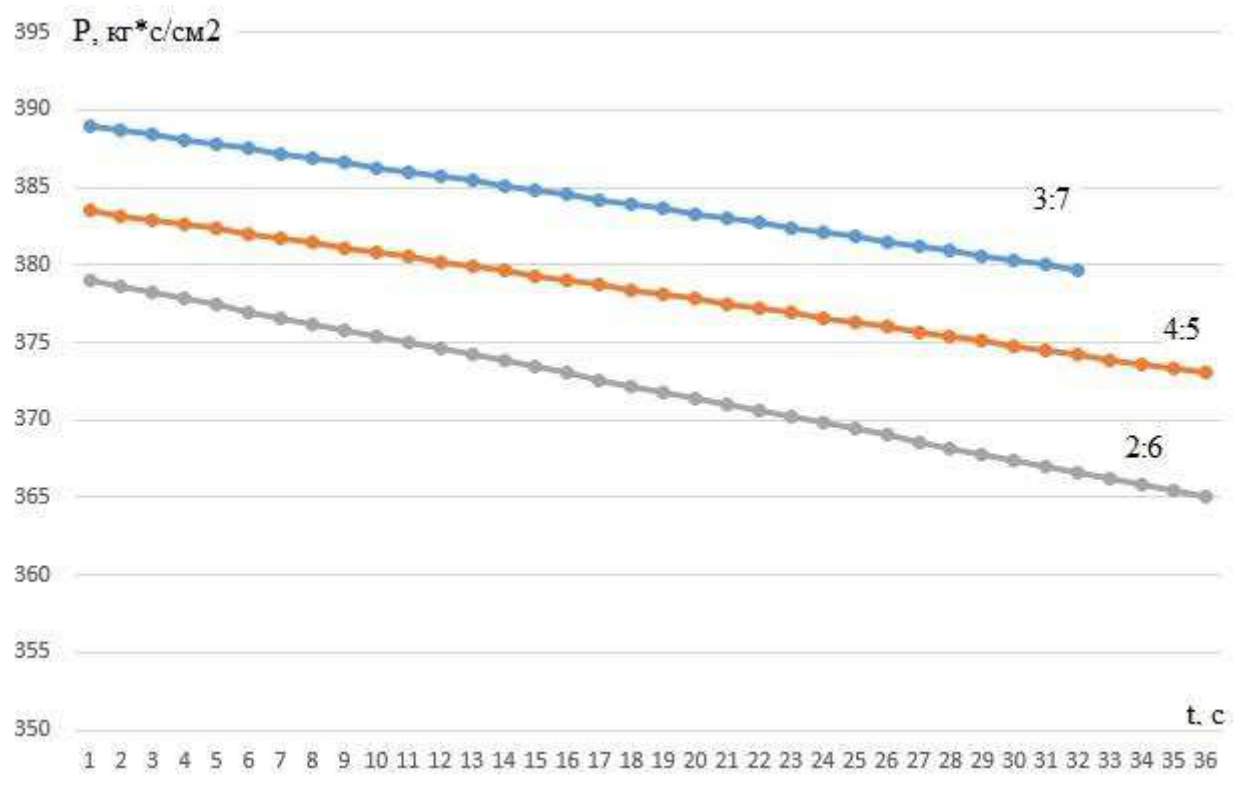


Рисунок 7 - Изменение давления с течением времени при разных расходах жидкости через перекачивающий насос

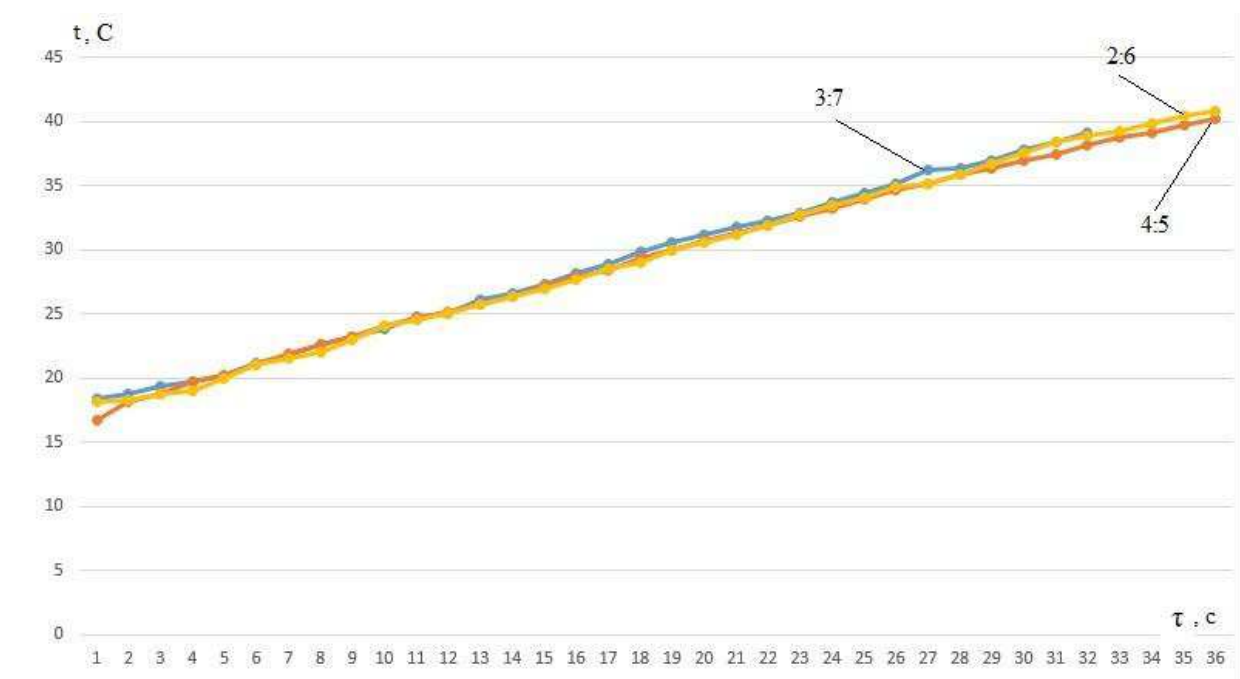


Рисунок 8 - Изменение температуры с течением времени при разных расходах жидкости через перекачивающий насос

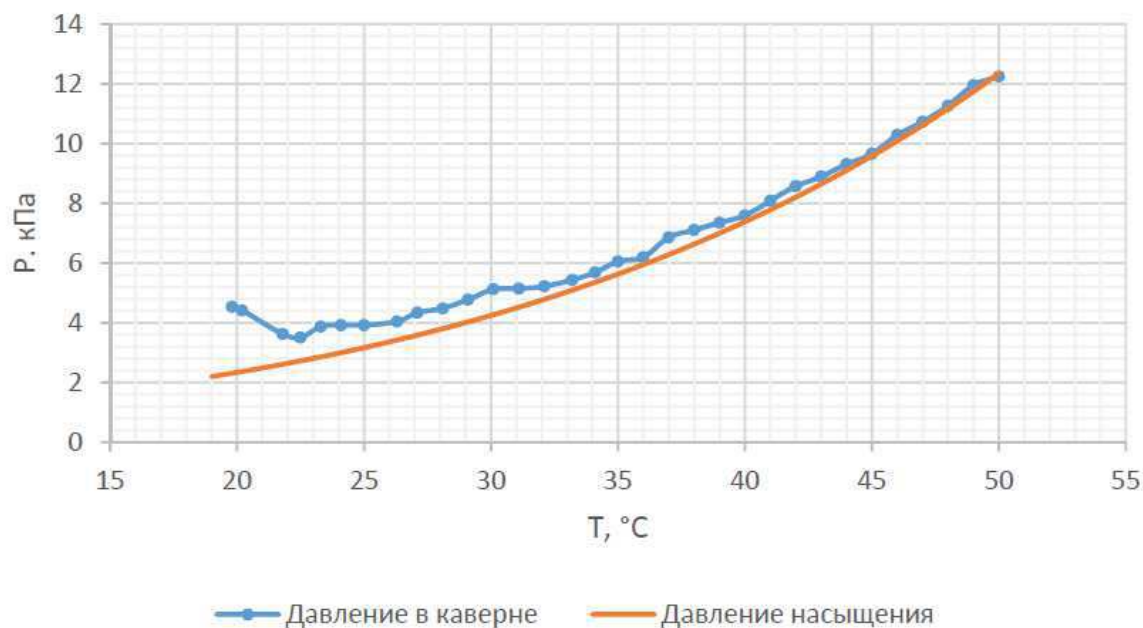


Рисунок 9 - Зависимость давления от температуры с течением времени

С небольшой погрешностью экспериментальные данные согласуются с теоретическими, что подтверждает исправную работу и достоверные результаты экспериментальной установки.

#### 4 Опреснение жидкости

Нехватка пресной воды все больше ощущается во всем мире, даже в США и странах Европы. А в таких странах, как Израиль или Иран запасов пресной воды совершенно не хватает для нужд населения и производства. Существует мнение, что в конце концов человечество окажется перед необходимостью добычи пресной воды из вод мирового океана.

**Опреснение морской воды** – это процесс снижения уровня солей в воде. В нормальной морской воде содержание солей порядка 3,5 процентов, а в воде, которая пригодна для питья, этот уровень не должен превышать 0,05 процента. Также не стоит забывать, что после опреснения обязательно будет

требоваться очистка воды от кальция и вредных составляющих, следовательно, необходимо использовать установки для водоочистки.

**Водоочистка** – серьезная задача при подготовке обычной пресной воды для использования человеком, а очистка опресненной воды - задача еще более сложная. Водоочистка морской воды сложна, потому что уровень содержащихся в морской воде микроорганизмов и их разнообразие гораздо выше, нежели в пресной воде. Более того, очистка морской воды еще осложняется тем, что в морской воде растворено гораздо больше химических соединений, чем в пресной и концентрация их гораздо выше. Все вышеперечисленное говорит о том, что водоочистка морской воды - процесс не менее сложный и важный, чем водоочистка пресной воды.

Существует несколько методов опреснения и последующей очистки морской воды. Одним из этих методов является метод дистилляции.

Дистилляция, или перегонка, основана на том, что вода - вещество летучее, а растворенные в ней соли - нелетучие. Морскую воду нагревают до температуры кипения, в результате чего образуется водяной пар, полученный пар забирается и охлаждается, в результате остается обычная вода. Но при использовании данного способа опреснения морской воды существуют несколько проблем, и самая основная проблема состоит в том, что при выпаривании соляной раствор, остающийся в дистилляторе, с каждым разом становится все более концентрированным. Это приводит к выходу из строя трубопроводов и самого дистиллятора, для решения этой проблемы используют многокамерные дистилляторы, а также часть опресненной воды сбрасывается с соляным раствором в море, а на ее место набирают новую порцию воды. Перед и после процесса дистилляции морская вода проходит процесс предварительной водоочистки.

Еще один способ опреснения морской воды и очистки ее от примесей является - установка обратного осмоса. При использовании данного метода водоочистка и опреснение воды происходит при помощи мембраны, проницаемой для воды и в тоже время непроницаемой для солей и иных

примесей, растворенных в морской воде, при помощи системы водоочистки и водоподготовки. Недостатком данного метода очистки и опреснения морской воды является малое количество получаемой пресной воды. Проблема в том, что морскую воду необходимо подавать на мембрану под давлением для того чтобы через мембрану просачивалась чистая вода, а соли оставались на обратной стороне фильтра. Установка по опреснению и очистке морской воды обычно представляет собой множество тонких трубок, стенки которых выложены изнутри ацетатом целлюлозы, морская вода подается в трубки под давлением, достаточным для того чтобы пресная вода просачивалась через фильтр. Такое давление называется осмотическим, необходимо следить за тем, чтобы оно не превысило допустимые величины, иначе мембрана может порваться или начать пропускать соли, растворенные в морской воде.

Также существуют другие методы опреснения морской воды, например, метод заморозки. Метод основан на том, что при превращении морской воды в лед, соли, растворенные в ней, в лед не попадают.

Как говорилось ранее, уделяя особое внимание процессу опреснения морской воды, нельзя забывать об очистке уже полученной пресной воды. Водоподготовка полученной воды в большинстве своем не отличается от процесса фильтрации и очистки обычной воды. Для очистки воды применяются фильтры грубой очистки, тонкой очистки и фильтры химической и биологической водоочистки.

К сожалению, на данный момент пока все еще не существует достаточно дешевого и эффективного метода опреснения морской воды, способного обеспечить все более возрастающие потребности человечества в пресной воде. Применяемые в данный момент методы опреснения морской воды или неэффективны, или стоимость получаемого литра опресненной воды слишком велика для использования в промышленных масштабах.

#### **4.1 Гидроволновой метод**



Новая технология очистки и обессоливания основана на применении гидроволнового метода, ранее не использовавшегося в этом направлении. Физические процессы, в основе которых лежит создание в водной среде особых гидродинамических режимов в сочетании с воздействием электромагнитных полей, создают в очищаемом растворе условия, способствующие испарению воды во много раз больше, чем в других известных случаях.

Впервые в мировой практике, очистка и опреснение водных сред от взвешенных частиц и растворимых веществ осуществляется только за счет гидродинамических эффектов при воздействии на воду источниками механических колебаний. Современные методы очистки и обессоливания водных сред различной степени загрязнения не обходятся либо без фильтрации (например, обратный осмос), либо термической дистилляции (например, выпаривание нагревом через стенку с последующей конденсацией пара). Все известные способы связаны с большими капитальными затратами на строительство и энергетическими затратами, расходными материалами и сопутствующими экологическими проблемами. Отличительной особенностью предложенной технологии, по отношению к известным мировым аналогам, является то, что очистка и обессоливание морской воды проводятся только за счет физических процессов, осуществляемых непосредственно в очищаемой воде.

Гидроволновой метод - это новая технология очистки и обессоливания воды. Физические процессы, в основе которых лежит создание в водной среде особых гидродинамических режимов за счет гидродинамических эффектов (кавитация) при воздействии на воду источниками механических колебаний в сочетании с воздействием электромагнитных полей, создают в очищаемом растворе условия, способствующие испарению воды во много раз больше, чем в других известных случаях.

В технологической схеме установки гидроволновой очистки и обессоливания морской воды, впервые в мировой практике, реализован

гидроволновой процесс, при котором за счет гидродинамических воздействий на очищаемую (морскую) воду и контактных теплообменных процессов идет интенсивное парообразование с последующей конденсацией, а оставшаяся часть воды (рассол) воздействием, комбинации высокочастотных электромагнитных и гидродинамических волн активно выделяет кристаллическую соль из раствора.

Преимущества гидроволновых установок:

- *В гидроволновых установках отсутствуют фильтры, сорбенты, ионообменные смолы, исключается использование химреагентов;*
- *Возможно безреагентным способом удалять все типы образующихся загрязнений;*
- *Нет необходимости в борьбе с отложениями примесей, накипеобразованием и т.п.;*
- *Удельные энергетические затраты меньше, чем для известных установок аналогичного назначения;*
- *Обеспечена полная экологическая безопасность;*
- *Возможно выделение солей в виде твердого осадка с их разделением по химическому составу;*
- *Характер обслуживания, профилактический осмотр и снятие показаний приборов работником низкой квалификации;*
- *Не требуется больших временных и капитальных затрат на строительство комплекса.*

Таблица 1 - Преимущества гидроволновых установок

МЕТОДЫ ОЧИСТКИ ВОДЫ			
№ ппп	Параметры	Гидроволновой метод	Другие методы
1	Надежность	•	
2	Степень обессоливания	•	
3	Удаление органики	•	
4	Предельная исходная	•	
5	Удаление микрофлоры	•	
6	Удаление взвесей	•	
7	Удаление растворенных газов	•	
8	Требование к подготовке	нет	есть
9	Энергозатраты	•	
10	Расход реагентов	нет	есть
11	Возможность выведения сухих отходов	•	
12	Возможность переработки отходов	•	
13	Ресурс работы	•	
14	Габариты	•	

Основные направления использования гидроволновых установок:

- Очистка и опреснение морской воды;
  - Очистка природных вод любой степени загрязнения;
  - Получение воды для медицинских целей (например, «Воды для инъекций»);
  - Очистка и утилизация жидких радиоактивных отходов «ЖРО»;
  - Получение устойчивых водотопливных эмульсий, топлив с новыми свойствами;
  - Очистка сточных вод промышленных предприятий высокой степени загрязнения.
  - Очистка емкостей и трубопроводов от отложений, загрязнений;
- Производство теплогенераторов с высоким (1:8) коэффициентом преобразования энергии для систем горячего водоснабжения и теплового обеспечения производственных и жилых объектов;*

Суть ГВТ технологии состоит в создании высокочастотного воздействия на воду. При этом возникают три ключевых процесса, необходимых для очистки: нагрев воды, стерилизация, деструкция молекул загрязнений. Насос подает воду на вращающийся с большой скоростью ротор с периодически открывающимися окнами (прорезями). Прорези закрыты - давление в воде повышено, прорези открываются - давление резко падает. Таким образом, вода нагревается до температур выше 100°C не тепловым, а механическим воздействием практически с ультразвуковой частотой. Перегретая вода подается на специальные препятствия, за которыми образуются кавитационные зоны пониженного давления - суперкаверны. Кипение там происходит уже при температуре 30-60°C. Отвод пара из многочисленных суперкаверн гидродинамического парогенератора понижает температуру водного потока, что используется для конденсации отводимого пара. Удельные энергозатраты, таким образом, снижаются до 3 кВт \*ч/м<sup>3</sup>, что значительно меньше, чем у известных аналогов.

Основное преимущество метода перед другими состоит в отсутствии

адсорбирующего материала, который в других установках мгновенно сам превращается в источник радиоактивного загрязнения. Не требуются расходные материалы (фильтры, мембраны, ионообменные смолы, сорбенты, химические реагенты и т.д.). Установка Аревы на Фукусиме проработала только три месяца и была остановлена из-за неполадок. После очистки 78 тыс. тонн воды она сама превратилась в источник радиоактивности, представляющий собой опасность для сотрудников станции во время ежемесячных мероприятий по ее техническому обслуживанию.

В ГВТ технологии не образуется радиоактивная «накись», так как не применяются привычные теплообменные системы. Основные преимущества ГВТ технологии:

- Жидкая среда нагревается и испаряется не через теплообменную поверхность, а за счет высокочастотного механического воздействия на жидкость;
- Все тепло конденсации пара может быть использовано для нагрева и испарения исходной жидкой среды;
- В результате высокочастотных воздействий происходит разложение органических молекул на безвредные простые компоненты;
- Технология на основе гидроволнового метода не требует водоподготовки;
- Возможно сочетание гидроволнового метода с использованием нанотехнологий, в частности, экологически нейтральных наноматериалов на углеродной основе;
- Имеется возможность осуществления звукохимических реакций, при которых соосаждение элементов и их изотопов из очищаемого потока может стать более эффективным;
- Процесс отличается малым энергопотреблением;
- Опасные отходы при использовании метода не образуются;

· Создаваемое на основе данного метода оборудование отличается надежностью, долговечностью и простотой эксплуатации. Кроме того, контейнерное исполнение установок позволяет избежать значительных капитальных затрат и эксплуатировать оборудование «прямо с колес». Области эффективного применения технологий на основе гидроволнового метода:

- очистка сточных вод различных промышленных, сельскохозяйственных предприятий и сферы ЖКХ любой степени загрязнения;
- удаление из сточных вод органических веществ, вызывающих «цветение» водных объектов (образование сине-зеленых водорослей);
- очистка промышленных стоков и подземных вод, загрязненных мышьяком и другими токсичными веществами;
- очистка ливневых стоков, инфильтрата полигонов и свалок отходов для защиты от загрязнения водоемов, рек и морей;
- очистка и опреснение морской воды, обезжелезивание, обессоливание природных вод различной степени загрязнения;
- очистка подземных и поверхностных источников водоснабжения от высокомолекулярных химических загрязнителей (метилтретбутилового эфира, стойких органических загрязнителей, полиароматических углеводородов и т. д.);
- обезвреживание несжигающим способом стойких органических загрязнителей, химических реактивов и отравляющих веществ;
- очистка промстоков в процессе нефтегазопереработки, а также очистка сырой нефти и нефтепродуктов от серы и других нежелательных примесей;
- удаление нефтешламов и остатков различных химических веществ в танках, цистернах, емкостях, трубопроводах;
- очистка токсичных промстоков в текстильной и кожевенной промышленности;
- очистка воды от высокосолевых жидких радиоактивных отходов;
- создание модифицированных водотопливных эмульсий;

- утилизация отработанных горюче-смазочных материалов путем создания стойких водотопливных эмульсий и последующего высокотемпературного их сжигания с одновременным получением энергии;
- создание высокоэффективного оборудования для производства биотоплива, например этанола, из отходов лесозаготовки и деревообработки, для очистки стоков ЦБК;
- создание экономичного вспомогательного оборудования для агропромышленного сектора.

Авторы ГВТ технологии утверждают, что она способна очищать воду за счет трансмутации от дейтерия, трития и радиоактивного углерода, но это утверждение требует независимой проверки в специализированной лаборатории ядерных исследований.

По данным редакции «ЮНИДО в России» (Организации Объединенных Наций по промышленному развитию (ЮНИДО)) в 2002 году запущена в эксплуатацию промышленная установка по очистке от железа и примесей артезианской воды производительностью 50 м<sup>3</sup>/час (1200 м<sup>3</sup>/сутки), создано производство нового коагулянта по очистке вод от различных примесей (нефти, нефтепродуктов, тяжёлых металлов и т.д.), была создана и направлена в Саудовскую Аравию опытная установка по очистке и опреснению морской воды производительностью 1 м<sup>3</sup> в час. С 2004 года на одном из государственных объектов в Московской области работает установка по очистке артезианских вод производительностью 50 м<sup>3</sup> в час. Установка очистки артезианских вод скважин производительностью 3 м<sup>3</sup> в час отправлена в Республику Коми на ОАО «Северная нефть». В Нижегородской области на аккумуляторном заводе в г. Бор запущена установка по обезжелезиванию воды производительностью 7 м<sup>3</sup> в час.

Разработана и успешно испытана опытная установка по очистке

низкоактивных жидких радиоактивных отходов для предприятий атомной промышленности. 2006 г. - успешно прошла испытания в условиях очистки стоков ИРТ-МИФИ установка по очистке ЖРО и химических загрязнений отходов промышленных предприятий «Мустанг», на Теченском каскаде водоёмов ФГУП «ПО «Маяк» прошла успешные испытания установка очистки ЖРО.

По линии государственного заказа на основе гидроволнового метода создана установка для обезвреживания отравляющих химических веществ и реакционных масс. В рамках международной программы запущены шесть установок кавитационной подготовки смеси отравляющих веществ и сточных вод для уничтожения в плазменной печи, на объекте п.

Марадыковский Кировской области успешно прошла испытания установка по обезвреживанию реакционных масс реальных отравляющих веществ на фосфорорганической основе, проходит испытания на существующих модулях предприятия установка по очистке сточных вод гидроволновым методом, по двум контрактам с ФГУП «ГосНИИОХТ» с имитаторами отравляющих веществ были подтверждены положительные результаты испытаний по обезвреживанию ОВ, по контракту с ФГУП «ГосНИИОХТ» изготовлена и успешно прошла испытания в п. Горный Саратовской области установка по извлечению неизвлекаемых остатков иприта в бочках.

Кроме того, проведены эксперименты по улучшению качества каспийской нефти (удалению серы и других нежелательных примесей) и по понижению температуры замерзания нефти (с +8 до -15 °С).

Получены лицензии на проектирование и производство оборудования для ядерных установок. Изготовленные водоочистные установки имеют все необходимые сертификаты и акты ввода в эксплуатацию. Разработки, в которых используется гидроволновой метод, защищены 15 российскими и зарубежными патентами.



На основе приведенных данных об установке ГВТ, применив преобразования для экспериментальной установки будет получен эффект опреснения. Данная установка будет иметь следующие преимущества:

- Отсутствуют фильтры, сорбенты, ионообменные смолы, исключается использование химреагентов;
- Возможно безреагентным способом удалять все типы образующихся загрязнений;
- Нет необходимости в борьбе с отложениями примесей, накипеобразованием и т.п.;
- Все тепло конденсации пара может быть использовано для нагрева и испарения исходной жидкой среды;
- Очистка воды от высокосолевых жидких радиоактивных отходов;

При реализации конденсации пара, исходя из объема воды в установке, можно рассчитать количество теплоты, выделяемое установкой, расход пара:

$$Q = m * c * (t_2 - t_1) \quad (4.1)$$

$$Q = 32 * 4200 * (50 - 20) = 4032 \text{ кДж}$$

Определим теоретический выход пара:

$$Q = m * c * (t_2 - t_1) = G * r \quad (4.2)$$

$$G_{\text{теор}} = \frac{Q}{r} \quad (4.3)$$

$$G_{\text{теор}} = \frac{4032}{2258} = 1,79 \text{ кг}$$

## 5 Теории кавитационного разрушения и диспергирования твердых тел

Вопросы диспергирования и кавитационного разрушения твердых тел в ультразвуковом поле привлекают внимание многих исследователей.

В литературе под термином ультразвуковая кавитация понимается образование в жидкости парогазовых полостей в фазе отрицательного давления звукового поля. По существу, это процесс нарушения сплошности жидкости в ее слабых местах, где по какой-либо причине нарушена симметрия межмолекулярных сил сцепления частиц жидкости (твердые, газообразные микровключения и др. причины). В фазе положительного давления происходит захлопывание такой полости, причем процесс этот сопровождается мощным гидродинамическим ударом, в результате которого, как предполагают многие авторы, и происходит разрушение твердых тел.

Одной из первых работ, объясняющей механизм кавитационного разрушения, является работа Релея. Автор рассмотрел случай захлопывания пустой полости в безграничном объеме жидкости под действием постоянного давления. Считая полость сферически симметричной и, исходя из условия, что кинетическая энергия движущейся жидкости равна работе, действующих на полость сил давления

$$2\pi\rho R^3 = \frac{4}{3}\pi P_0 (R_{\text{макс}}^3 - R^3) \quad (5.1)$$

Релей определил скорость движения стенки полости в функции ее радиуса

$$U = \sqrt{\frac{2 P_0}{3 \rho} \left( \frac{R_{\text{макс}}^3}{R^3} - 1 \right)} \quad (5.2)$$

где  $\rho$  - плотность жидкости;

$U$  - скорость движения стенки полости;

$R$  – радиус полости;

$P_0$  - внешнее давление, приложенное к полости.

Далее, рассматривая уравнение движения сферически симметричного потока

$$\frac{\partial u}{\partial t} + U \frac{\partial u}{\partial r} = - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial r} \quad (5.3)$$

и, используя граничное условие, что на стенке полости  $r = R$ , Релей для максимального давления, возникающего при захлопывании пустой полости, получил выражение

$$P_{\text{макс}} = 0,163 P_0 \frac{R_{\text{макс}}^3}{R^3} \quad (5.4)$$

Несколько по-иному рассмотрел задачу захлопывания пустой полости Кук. Если Релей рассчитал давление вне захлопывающей полости, то Кук предположил, что при захлопывании кавитационной полости жидкость устремляется с большой скоростью к ее центру и непосредственно ударяет по поверхности твердого тела, находящегося внутри полости. Кук подсчитал давление, возникающее на поверхности сферического тела в тот момент, когда жидкость достигает его поверхности:

$$P = U \sqrt{\rho K} \quad (5.5)$$

где  $K$  - модуль объемной упругости жидкости.

Подставляя выражение для скорости стенки полости из работы Релея в формулу для давления Кука можно получить уравнение для расчета давления, действующего на твердую поверхность, находящуюся в центре полости.

$$P = \sqrt{\frac{2 P_0 K}{3} \left( \frac{R_{\text{макс}}^3}{R^3} - 1 \right)} \quad (5.6)$$

Результаты расчета давлений по теориям Релея и Кука приведены в таблице.

Таблица 2 – Результаты расчета давлений по теориям Релея и Кука

**Расчет максимальных давлений по Релею и Куку**  
( $K = 2 \cdot 10^4$  атм.  $P_0 = 10$  атм.)

$R_{\text{макс}}/R$	Максимальное давление, атм.	
	по Релею	по Куку
3	45	615
5	210	2900
7	560	7800
10	1600	22000
15	5500	77000

Из таблицы видно, что давления, возникающие при захлопывании кавитационной полости, могут достигать значений в десятки тысяч атмосфер.

Развивая идеи Кука о гидравлическом ударе, Корнфельд и Суворов предположили, что благодаря неустойчивости сферической формы кавитационных полостей, находящихся вблизи твердой поверхности, между средой и полостью могут возникнуть гидродинамические силы, вызывающие образование струи жидкости ударяющихся с большой скоростью о поверхность твердого тела. Поэтому авторы предложили оценивать

давления, возникающие в момент соприкосновения струи с твердым телом, по формуле Кука.

Исходя из соотношения  $K = \rho c^2$ , где  $c$  - скорость звука в данной среде формулу Кука можно привести к виду.

$$P = K \frac{U}{c} \quad (5.7)$$

или записать в виде

$$P = \rho c U \quad (5.8)$$

Во всех вышеуказанных формулах, полученных на основании теории Кука, не учитывается сжимаемость твердой поверхности. Учет сжимаемости сделал Галлер.

С поправкой Галлера, например, последняя формула записывается в виде:

$$P = \frac{U \rho_1 c_1}{1 + \frac{\rho_1 c_1}{\rho_2 c_2}} \quad (5.9)$$

где индексы «1» относятся к среде, а «2» к твердому телу.

Ряд авторов объясняют кавитационное разрушение материала наличием трещин и пор на его поверхности.

Тома высказал предположение о возможности гидравлического удара в порах твердого тела. По его мнению, в жидкости, которая находится в

трещинах и порах, могут развиваться кавитационные полости, которые при захлопывании создают значительные давления. Автор расчетом показал, что в трещине длиной 10 мм и шириной 1 мм при наружном давлении 1 атм. могут возникать давления до 50 атм.

Галлер считает, что в поры и трещины попадает вода, а гидравлические удары, возникающие при захлопывании кавитационных полостей, действуют подобно клину, разрушая поверхность твердого тела.

Поултер опытами на стекле и кварце показал, что разрушение поверхности твердого тела происходит в момент выброса жидкости из трещин или пор. По его мнению, жидкость в фазе сжатия кавитационной полости проникает в трещину, а в фазе разряжения оттуда выбрасывается.

Фрид также придерживается гипотезы, что разрушение поверхности происходит в момент выброса жидкости из пор и трещин. По его мнению, имеющиеся на поверхности твердого тела поры и трещины заполнены воздухом. Под действием местных высоких давлений, возникающих при захлопывании кавитационной полости, жидкость вдавливается в микротрещины и поры, и воздух, находящийся в них, подвергаясь адиабатическому сжатию, нагревается до высоких температур.

Под действием температуры происходит интенсивная коррозия на микроповерхности трещины или поры, причем возможно оплавление ее границ. Одновременно с этим происходит, нагрев некоторого слоя жидкости, проникнувшей в пору и соприкасающейся с нагретым воздухом. В момент спада местного давления, жидкость и образовавшиеся пары, находящиеся под большим давлением, выбрасываются из микротрещины или поры, вследствие чего происходит интенсивная эрозия поверхности металла.

Некоторые авторы связывают разрушения, образуемые на поверхности твердого тела при ультразвуковой кавитации, с пульсацией газовых пузырьков в переменном поле звуковой волны.

Смит считает, что газовые пузырьки с диаметром значительно меньшим, чем, чем длина звуковой волны, можно рассматривать как механическую систему, колеблющуюся с одной степенью свободы. Но для такой системы уравнение движения записывается в виде:

$$P(t) = m\ddot{x} + \alpha\dot{x} + kx \quad (5.10)$$

где  $P(t)$  - давление в звуковой волне, являющейся периодической функцией времени;

$x = (R - R_{\text{равн}})$  - перемещение полости от равновесного состояния;

$m\ddot{x}$  - давление, возникающее за счет кинетической энергии жидкости, движущейся вследствие пульсации полости;

$\alpha\dot{x}$  - сила трения на единицу площади, действующая на систему, совершающую гармонические малые колебания;

$kx$  - восстанавливающая сила на единицу площади, возникающая вследствие сжимаемости газа в полости.

Учитывая условия резонанса такой системы

$$m\ddot{x} + kx = 0 \quad (5.11)$$

автор получил значение резонансного радиуса кавитационной полости для заданной частоты звукового поля в виде:

$$R_{рез} = \frac{1}{\omega} \sqrt{\frac{3\gamma}{\rho} \left( P_{ст} + \frac{2\sigma}{R_{рез}} \right)}$$
(5.12)

где  $\omega$  - циклическая частота изменения звукового поля;

$\gamma$  - показатель политропы для газа в полости;

$P_{ст}$  - гидростатическое давление;

$\sigma$  - коэффициент поверхностного натяжения.

Далее для полостей, размеры которых близки к резонансным, Смит находит увеличение тангенциального напряжения на их поверхности

$$A = \frac{k}{\gamma P_{ст}}$$
(5.13)

При  $P_{ст} = 1$  атм. для воздушного пузырька в воде  $A = 14700$ .

По мнению Смита, такое повышение тангенциального напряжения на стенке газового резонансного пузырька может вызвать повреждение твердой поверхности, находящейся с ним в контакте.

Теории разрушения поверхности твердого тела газовыми пульсирующими пузырьками придерживается и Козырев. Однако, по его мнению, механизм разрушения несколько иной. Автор считает, что при пульсациях каверн возникают гидравлические удары в окружающей жидкости, т.е. кавитационная полость при пульсациях может играть роль генератора ударных волн. Как указывает автор, при периодических пульсациях пузырьков с частотой свыше 7 кГц даже слабые удары могут вызвать значительные разрушения.



Подобной теории придерживается и Хоукинс.

Некоторые исследователи считают, что кавитационное разрушение твердых тел возникает за счет пузырьков неполной сферической формы, находящихся в контакте с твердой поверхностью.

Хасмук подсчитал величину ударного давления для случая, когда происходит захлопывание полости, имеющей форму полусферы на поверхности твердого тела. В этом случае необходимо считаться с фактором трения на границе жидкости и твердого тела. Определив скорость движения поверхности полости из условия равенства кинетической энергии жидкости, устремляющейся к центру полости, и работы сил давления, автор получил выражение

$$P = 1,63 \sqrt{\frac{2}{3} P_0 K + \frac{\sigma}{a}} \quad (5.14)$$

где  $a$  - большая полуось эллипсоида;

Для  $P_0 = 10$  атм. давление воды в центре захлопывающейся полусферы равно  $P = 600$  атм. Однако с учетом турбулентности потока автор допускает возрастание величины давления в девять раз.

Дальнейшее изучение динамики не сферических пузырьков было проведено в работе Ноде и Эллиса. Авторы в развитие идей Корнфельда теоретически показали, что при захлопывании неполусферических пузырьков возникает нестабильная поверхность раздела, принимающая форму струи. Высокоскоростная киносъемка захлопывающихся пузырьков, образованных электрической искрой в воде, показала, что струя жидкости врывается в захлопывающуюся кавитационную полость и взаимодействует с поверхностью твердого тела, разрушая ее.

Авторы провели исследование динамики захлопывающегося пузырька на поверхности алюминиевого образца и обнаружили, что язва эрозии имеет диаметр  $1/16$  от минимального размера, достигаемого полостью при захлопывании. На основании этого эксперимента авторы ставят под сомнение возможность образования язв эрозии за счет ударной волны, возникающей в результате сжатия газа и пара в кавитационном пузырьке.

Далее авторы провели дополнительные исследования, чтобы выяснить роль в кавитационном разрушении парогазовых пузырьков, захлопывающихся вблизи поверхности твердого тела. Создавая при помощи искрового разряда пузырьки с максимальным радиусом 0,4 см на различных расстояниях от поверхности образца, они измеряли напряжения, возникающие на его поверхности.

Авторы нашли, что давление в волнах сжатия, возникающих на поверхности твердого тела от пузырьков, захлопывающихся в жидкости, не превышает 90 атм. Даже допуская, что пузырьки, образованные электрической искрой, содержат, возможно, больше газа, чем кавитационные, авторы высказывают сомнение, чтобы подобные пузырьки могли играть серьезную роль в кавитационном процессе разрушения.

Эта же точка зрения нашла отражение и в совместной работе Эллиса, Слейтора и Форнея.

Работа Шатлера и Меслера также посвящена изучению динамики несферических пузырьков, захлопывающихся в контакте с твердой поверхностью, но результаты этой работы прямо противоположны работе Ноде и Элиса.

Соглашаясь, что при захлопывании кавитационного пузырька может возникнуть, струя жидкости, ударяющая о поверхность твердого тела, авторы, на основании данных высокоскоростной киносъемки и анализа кавитационных повреждений пришли к выводу, что эрозия поверхности возникает благодаря захлопыванию кавитационных пузырьков, образованных из первоначальной полости после того, как последняя распадается на части под действием струи, врывающейся внутрь.

Как показали авторы, струя жидкости не может вызвать разрушения даже самых непрочных материалов. Это мотивируется тем, что в месте соприкосновения струи с поверхностью тела повреждений обнаружено не было. Авторы утверждают, что ими выяснено, что эрозия поверхности вызывается импульсом сил давления от сжатия газа в полости при достижении минимального объема при захлопывании. Как и у Ноде и Элліса пузырьки в жидкости образовывались в результате электроискрового разряда и фотографировались высокоскоростной кинокамерой.

Однако авторы, придерживающиеся теории струи при кавитационном воздействии, обычно ссылаются на экспериментальный факт, что при воздействии на поверхность металла струями жидкости движущихся с большой скоростью, характер повреждений соответствует кавитационным.

Нолтинг и Непирас, рассматривая поведение газового пузырька в звуковом поле, предположили, что в стадии захлопывания, сжатие газа в пузырьке происходит по адиабатическому закону. Они предложили формулу для оценки температуры в полости, когда она достигает минимального объема.

$$T = T_0 \left( \frac{P_0}{3 P_{по}} \right)^{3(\gamma-1)} \quad (5.15)$$

где

$P_0$  - внешнее давление в жидкости;

$T_0$  - начальная температура;

$P_{по}$  - давление газа и пара в полости при минимальном радиусе;

$\gamma$  - показатель политропы.

Авторы подсчитали, что в конечной стадии захлопывания возникают высокие температуры до 10 000 градусов Кельвина. Однако, сами авторы считают, что столь высокие температуры могут существовать только в небольших локализованных объемах, и не могут оказывать разрушительного действия на поверхность твердых тел.

Дальнейшее развитие теории высоких температур при кавитации было сделано Гютом. Выражение для максимальной температуры, которая может возникнуть в центре пузырька при минимальном объеме, Гют получил в виде

$$T = T_0 (\gamma + 1) \left( \frac{P_{по}}{P_0} \right)^{\frac{1}{\gamma}} \quad (5.16)$$

Перник для подсчета температуры, при тех же условиях, приводит следующее выражение

$$T = T_0 \left[ 1 + (\gamma - 1) \frac{P_0}{P_{по}} \right] \quad (5.17)$$

Ряд авторов для обоснования термической теории кавитационного разрушения пытались непосредственно измерить температуру кавитационных пузырьков. Маринеско для этой цели использовал взрывчатые порошки, не смачиваемые жидкостью. Порошки с различной,

но известной температурой воспламенения подмешивались в жидкость, в которой возбуждалась кавитация. Температура кавитационных пузырьков, определенная таким способом, равнялась 230 град. Цельсия.

Подобный эксперимент провел Кружилин. Значение температуры кавитационного пузырька было получено в пределах 300-350 град. Цельсия.

Гавранек для подсчета температуры, которая передается кавитационным пузырьком поверхности металла, использовал уравнение Нолтинга и Непираса для скорости захлопывания кавитационной полости

$$1,5\rho\dot{R} = P(Z-1) - \frac{P_{\text{во}}}{1-\gamma}(Z-Z^{\gamma}) \quad (5.18)$$

где

$$Z = \frac{R_{\text{макс}}^3}{R^3} \quad (5.19)$$

Полагая, что в момент захлопывания полости  $R\&=0$  и считая, что минимальный радиус полости равен радиусу полусферической эрозионной ямки на поверхности образца, авторы, определив  $R_{\text{мин}}$  оптическим способом, а также, положив, что  $P_{\text{по}}$  равно давлению насыщенных паров, определили из выше написанного уравнения показатель политропы. Далее, с учетом теплопроводности авторы подсчитали, что микрообъемы металла, соприкасающиеся с кавитационной полостью, нагреваются до температуры 300...500 град. Цельсия.

Несколько по-иному определили температуру нагрева поверхности металла при кавитации Кнапп и Уиллер. Они подсчитали работу, необходимую для образования язвинки эрозии, предполагая, что последняя образуется вследствие захлопывания одиночного сферического кавитационного пузырька.

Считая, что около 65% этой работы превращается в тепло, и что в момент окончания эрозии количество тепла определяется объемом эрозионного материала, авторы нашли, что мгновенное повышение температуры для алюминия составит 137 град. Цельсия.

Соответствующие величины температур для других металлов почти пропорциональны их твердости. Так для холоднокатаной стали, температура нагрева составит 635 град. Цельсия. Анализируя тепловой баланс после окончания процесса эрозии, и считая, что период тепловой пульсации равен 1 мсек., Уиллер получил, что за 4 мсек. температура снизится до половины своего первоначального значения, а за 9 мсек. до 1/3 первоначальной величины.

Авторы, придерживающиеся термической гипотезы кавитационной эрозии, ссылаются обычно на следующие экспериментальные факты:

- а) зависимость интенсивности эрозии от температуры плавления некоторых металлов;
  - б) отпуск некоторых закаленных сталей;
  - в) быстрым окислением металлов при коротком кавитационном воздействии.
- Это связывается с тем, что при высоких температурах химическое взаимодействие воды и металлов значительно ускоряется.

Однако, следует признать, что термические гипотезы, подтверждаются только косвенно и не могут объяснить ряда явлений, сопутствующих кавитационной эрозии (наклеп поверхности металлов и др.)

Некоторые исследователи для объяснения причины кавитационного разрушения отождествляют процесс развития кавитационной полости с точечным взрывом.

Остроумов полагает, что в результате захлопывания кавитационного пузырька, находящегося на поверхности раздела с твердым телом возникает микроскопический по размерам, но огромный по интенсивности взрыв. Исходя из предположения, что энергия такого взрыва равна энергии кавитационного пузырька после одиночного акта схлопывания, а также, что силы, вызывающие разрушение, больше сил сцепления молекул твердого тела, автор считает, что различие между свойствами твердого тела и жидкости в окрестности взрыва стираются, что позволяет принять одинаковый показатель адиабаты, как для жидкости, так и для твердого тела.

Автор нашел, что при таком рассмотрении, энергия взрыва делится между средами обратно пропорционально корню 4-степени из их плотностей. Автор также оценил массу разрушенного участка твердого тела, которая оказалась обратно пропорциональной квадрату скорости звука в нем. Дальнейшее развитие эта гипотеза получила в совместной работе Коробейникова и Остроумова.

Много исследователей придерживается точки зрения, что причиной кавитационного разрушения является ударная волна, возникающая в жидкости в тот момент, когда кавитационная полость, достигая минимального объема, вновь начинает расширяться под действием давления пара и газа, сжатых в полости.

Подробно условия возникновения ударных волн, возникающих после начала вторичной пульсации кавитационной полости, исследовал Брук Бенъямин. Он показал, что возникновение ударных волн зависит от

максимального давления парогазовой смеси в полости при ее захлопывании. Условие образования ударных волн на расстоянии  $r$  от центра полости автор получил в виде:

$$P_{\text{макс}} > 13600 \left( \log \frac{r}{R_{\text{мин}}} \right)^{\frac{2}{3}} \quad (5.20)$$

где

$P_{\text{макс}}$  - максимальное давление парогазовой смеси в полости при ее захлопывании;

$R_{\text{мин}}$  - минимальный радиус, достигнутый полостью в стадии захлопывания.

Следующая таблица, составленная автором, иллюстрирует приведенную формулу для воды

Таблица 3 – Максимальное давление парогазовой смеси в полости

$r/R_{\text{мин}}$	$10^8$	$10^7$	$10^6$	$10^5$	$10^4$
$P_{\text{макс}}, \text{атм.}$	1900	2100	2300	2700	3100

Автор указывает, что для образования ударных волн в жидкости необходимо, чтобы давление в кавитационной полости при ее минимальном радиусе было не менее 2-3 тыс. атмосфер.

Образование ударных волн при захлопывании кавитационной полости и их последующее распространение исследовали Хиклинг и Плессет. Они рассмотрели задачу о схлопывании сферического газового пузырька в безграничном объеме жидкости, причем учитывалась сжимаемость воды. В процессе счета варьировались содержание газа в пузырьке, показатель



адиабаты и внешнее давление. Авторы привели графики, из которых видно, что при вторичном расширении кавитационной полости в жидкости образуется волна сжатия.

Авторы считают, что полученные результаты указывают на возможность разрушения твердых тел, находящихся на некотором расстоянии от кавитационной полости. Как показали расчеты авторов, максимальное значение давления в ударной волне достигает 10 тыс. атмосфер, причем падает с расстоянием в отношении  $1/r$ . По данным авторов минимальное значение давления парогазовой смеси в полости, необходимое для возникновения ударных волн, должно составить в конце фазы захлопывания около 1000 атм.

Изучению ударных волн, образующихся при вторичном расширении кавитационной полости, посвящена также работа Бранда. Автор показал, что интенсивность ударных волн зависит от минимального радиуса полости, достигнутого в фазе захлопывания. Чем меньше величина  $R_{\min}$ , тем больше интенсивность ударной волны.

Волны сжатия, образующиеся при расширении сферической полости, рассмотрены в работе Наугольных.

Айвени и Хэмит путем численного решения уравнения движения кавитационной полости в вязкой сжимаемой жидкости пытались выяснить могут ли ударные волны образоваться в период захлопывания кавитационной полости. Как указывают авторы, ударных волн в фазе захлопывания кавитационной полости им обнаружить не удалось. Согласно расчетам авторов, при захлопывании полости давление в жидкости на расстоянии равном начальному радиусу пузырька не увеличивается до такой степени, чтобы вызвать разрушение твердых тел.

Однако, при вторичном расширении полости с газом может образоваться ударная волна. Меньшее количество пара и газа в полости приводит к более полному захлопыванию и результирующее давление возрастает.

Ряд авторов путем экспериментальных исследований пытались оценить давления, возникающие при захлопывании кавитационной полости.

Гют получил фотографию волн давления, распространяющихся от кавитационной полости. Осборн, Честермен, Харрисон и Меллен, применяя различные типы пьезоэлектрических датчиков, измеряли давления, пиковые значения которых, согласно опубликованным данным, составляли  $2 \dots 10$  атм., в зависимости от расстояния до центра захлопывающейся полости.

Более совершенную методику применяли Эллис и Саттон. Авторы пытались количественно оценить напряжения, возникающие на поверхности образца из специального материала, позволяющего измерить давления, возникающие при захлопывании кавитационных пузырьков.

Согласно Саттону, кавитационные пузырьки с минимальным радиусом при захлопывании равным  $0,025$  мм могут производить импульсные давления до  $100\,000$  атм. Причем, продолжительность импульса давления составляет  $1-2$  мксек.

Изучению волн давлений, образующихся при захлопывании полости, посвящена также работа Ионса и Эдварда. Они образовали пузырек при помощи электрической искры на конце специального инструмента и измеряли давление в нем. Авторы определили, что давления достигают величины  $10\,000$  атм., причем величина давления зависит от времени

захлопывания полости. Согласно оценкам авторов величины давлений, при минимальном объеме полости могут достигать значений до 107 атм.

К одной из последних работ на эту тему относится исследование Нумачи. Автор измерял напряжения, возникающие в твердом теле при захлопывании кавитационных пузырьков, образуемых ультразвуком. Величина импульса давления, замеренного автором, составила 70 кг/см<sup>2</sup>. Автор считает, что импульсы давления достаточные для разрушения твердых тел, излучаются при сжатии кавитационных пузырьков до размера 0,017...0,062 мм. Автор отмечает, что полученные значения давлений при ультразвуковой кавитации в 5-6 раз выше, чем в случае гидродинамической кавитации на профилях.

Попытки экспериментального изучения ударных волн, возникающих при кавитации, имели место и в других работах.

Известно много работ, в которых указывается, что причиной кавитационной эрозии являются электрические явления, сопутствующие захлопыванию кавитационных пузырьков.

Электрическая теория основывается на идее высказанной Френкелем и развитой Натасоном. Согласно этой теории, на чечевицеобразной стенке полости, образующейся при разрыве жидкости, возникают заряды противоположных знаков. Происхождение этих зарядов связано с наличием ионов, растворенных в воде веществ. Если возникшее электрическое поле достаточно велико, а давление паров мало, то между стенками полости происходит электрический разряд.

Авторы этой теории ссылаются на экспериментальный факт, что кавитационные повреждения напоминают поверхность, обработанную электроискровым способом.

Ряд теорий исходит из того, что кавитационное разрушение - результат совместного действия механических и электрохимических процессов.

Теория, получившая название электрохимической считает, что разрушение ускоряется благодаря явлениям электролиза, возникающим в металле из-за высоко-локализованных напряжений сжатия, имеющих место на малых площадях поверхности металла при захлопывании кавитационных пузырьков. При этом анодом являются точки деформации, а тело металла является катодом. Это явление местного электролиза было установлено экспериментально.

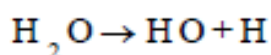
Термоэлектрическая теория механизм появления электрического тока объясняет по-иному. По этой теории локализованные удары, образующиеся при захлопывании полостей, вызывают местный нагрев поверхности металла. Нагретая и не нагретая части поверхности образуют термопару, электрический ток, которой и вызывает электрохимические процессы при кавитации, что, в конце концов, приводит к разрушению.

Сторонники электрохимических теорий кавитационного разрушения обычно ссылаются на экспериментальный факт, что катодная защита значительно снижает кавитационное разрушение, что, по их мнению, и доказывает наличие электрохимических процессов при кавитационном разрушении.

Однако, имеется ряд работ, где показано, что защитный эффект при катодной защите возникает благодаря слою газа (водорода), образуемого на

поверхности металла, который является как бы защитным слоем от ударного воздействия кавитационных пузырьков. Так, если уменьшить напряжение и ток, чтобы газовыделения не было, то эффект катодной защиты пропадает.

Некоторые авторы считают, что кавитационное разрушение происходит благодаря совместному действию механического и химического фактора. Считается установленным, благодаря кавитационному захлопыванию полости молекулы воды расщепляются на валентно ненасыщенные весьма реакционноспособные Н, и ОН радикалы.



(5.21)

Атомы водорода проникают в кристаллическую решетку твердого тела, чем способствуют понижению усталостной прочности металла.

Другие авторы указывают на различные побочные химические явления, сопутствующие кавитационному разрушению.

Крянин отмечает, что после того, как на поверхности металла образовались трещины, вода, проникая в них, способствует образованию окислов, которые оказывают расклинивающее действие.

Уиллер считает, что коррозионные явления активизируются благодаря тому, что при ударном кавитационном воздействии с поверхности 'металла удаляется окисная пленка.

Большое количество работ посвящено исследованию изменений, происходящих в физико-химической структуре материала, подвергнувшемуся кавитационному разрушению. В связи, с чем выдвигается ряд гипотез.

Некоторые авторы выдвинули теорию волнового действия кавитации на кристаллическую структуру твердых тел. По этой теории главную роль в разрушении играет явление резонанса в колебаниях отдельных (кристаллов и их групп).

Другие считают, что кавитационная эрозия возникает вследствие прохождения волн давлений, частота которых совпадает с частотой собственных колебаний зерен или их конгломератов. Возбудителями волн давлений являются кавитационные пузырьки.

Гавранек и Болшуткин на основе проведенных ими рентгенографических исследований кавитационной эрозии монокристаллов алюминия высказали предположение о возможности объяснения хрупкого разрушения металлов в условиях кавитации распространением волн напряжений в металле, вследствие ударного воздействия кавитационных пузырьков.

Богачев полагает, что эрозия металла является следствием механического ударного воздействия, локализованного в объемах, соизмеримых с размером отдельного зерна или его части, т.е. в микрообъемах металла. Автор считает, что кавитационная стойкость материала определяется не условными механическими характеристиками металлического изделия в целом, как например, предел прочности, твердость и т.д., а прочностью отдельных микрообъемов: структурой и свойствами зерна и его границ.

Ряд работ посвящен выяснению влияния коррозионного фактора в кавитационном разрушении.

Плессет и Эллис отрицают значительное влияние эффекта коррозии на процесс кавитационного разрушения. Они провели сравнительные испытания на кавитационную стойкость никелевого образца в воде и толуоле. Авторы получили, что степень кавитационного разрушения в обеих жидкостях одинакова.

Гликман считает, что если процесс кавитационного воздействия происходит при одновременном действии коррозионной среды, то нельзя не считаться с влиянием коррозионного фактора на процесс кавитационного разрушения. Однако, по мнению автора, роль этого коррозионного фактора является вспомогательной, ведущую роль играет механическое воздействие.

По мнению автора, роль коррозионного фактора сводится к ускорению процесса кавитационного разрушения, причем влияние — это будет тем больше, чем меньше коррозионная стойкость материала. Для коррозионностойких материалов разрушение обусловлено практически без участия коррозионного фактора. Как указывает автор, скорость кавитационного разрушения превосходит скорость коррозионного разрушения на четыре порядка. К аналогичному выводу пришел и Уиллер.

Имеется ряд теорий разрушения материалов в ультразвуковом поле, которые отрицают кавитационный механизм воздействия.

По мнению Ржевкина и Островского, в результате прохождения звуковой волны сквозь твердое тело в последнем в различных его точках возникают разные по величине ускорения, которые приводят к возникновению значительных усилий. Так, если амплитуда ускорения в звуковой волне будет равна

$$g_0 = \frac{P_{зв}}{\rho} \frac{2\pi}{\lambda} \quad (5.22)$$

где  $\lambda$  - длина волны звукового поля, то изменение величины ускорения на длине  $x$  будет равно

$$\Delta g = \frac{P_{зв}}{\rho} \frac{4\pi^2}{\lambda^2} \Delta x \quad (5.23)$$

Авторы приводят расчет, который показывает, что для частоты 580 кГц в воде при длине волны 2,5 мм и давлении  $P_{зв} = 0,5 \cdot 10^6$  бар на расстоянии 1 мкм возникает градиент ускорения равный 30g, где  $g$  - ускорение силы тяжести.

Имеются и другие гипотезы разрушения в звуковом поле, которые, однако не получили широкого экспериментального подтверждения, а именно разрушение (диспергирование) за счет соударения частиц, за счет трения о твердое тело и т.д.

### **5.1 Факторы, влияющие на интенсификацию процессов диспергирования и кавитационного разрушения**

Анализ обширной литературы по этому вопросу привел к выводу, что основными факторами, которые могут значительно интенсифицировать процесс кавитационного разрушения материала, являются: физико-химические свойства и температура рабочей жидкости, амплитуда звуковых колебаний и внешнее статическое давление.

Наиболее полно влияние физико-химических свойств жидкости на процесс кавитационного разрушения исследовано в работах Меттера,



Вилсона, Бебчука, Образцова, Антони и Башкирова. Если обобщить данные, полученные в этих работах, то можно отметить следующие.

### **5.1.1 Газовая фаза**

На кавитационный процесс разрушения влияет как количество газа в жидкости, так и его природа. Известно, что газы обладают различными коэффициентами диффузии и растворимости в жидкости. Благодаря разным коэффициентам диффузии скорость проникновения растворенных газов в кавитационную полость будет различной, в связи, с чем величина противодействия при захлопывании внутри такой полости будет не одинаковой для разных газов и будет, тем больше, чем выше коэффициент диффузии. При насыщении жидкости газом с большей растворимостью и коэффициентом диффузии эффективность кавитационного разрушения может быть сведена к минимуму.

### **5.1.2 Коэффициент поверхностного натяжения, давление насыщенных паров и вязкость жидкости**

Влияние коэффициента поверхностного натяжения не является определяющим в кавитационном процессе и роль его невелика. Однако, ряд исследователей придерживается мнения, что жидкости с большим коэффициентом поверхностного натяжения более предпочтительны для ультразвуковой технологии.

С увеличением давления насыщенного пара жидкости кавитационное разрушение уменьшается, причем, зависимость эта имеет резко выраженный характер.

Влияние вязкости жидкости на процесс кавитационного разрушения не получило четкого отражения в литературе. Одни авторы считают, что увеличение вязкости жидкости уменьшает максимальную радиальную скорость движения стенки кавитационной полости и делают вывод, что с увеличением вязкости разрушительное действие волн давлений излучаемых полостью уменьшается.

Другие полагают, что увеличение вязкости влияет на амплитуду преобразователя, уменьшая ее, что, в конечном счете, и приводит к уменьшению эрозии, однако, если сохранить амплитуду вибратора постоянной, то влияние вязкости на процесс кавитационного разрушения не сказывается.

Некоторые авторы отмечают увеличение кавитационного воздействия при увеличении вязкости рабочей среды. Свою точку зрения они мотивируют тем, что повышение вязкости препятствует увеличению в звуковом поле размеров парогазовых пузырьков до таких значений, при которых они не успевают захлопнуться в полупериод сжатия, т.е. сокращается число осциллирующих пузырьков и растет число кавитационных пузырьков. Это, по мнению авторов, и приводит к увеличению интенсивности ударных волн и существенному повышению кавитационного разрушения.

### **5.1.3 Температура**

Влияние температуры на процесс кавитационного разрушения наиболее полно исследовано в работах Шамба, Бебчука, Хиклинга и Сиротюка. Во всех работах отмечается зависимость кавитационной эрозии твердых тел от температуры. В работах Шамба и Хиклинга максимум эрозии в воде имеет место при 40°C, в работе Бебчука - при 50°C. Кроме того, в

работах Шамба и Бебчука снимались температурные зависимости кавитационного разрушения и для различных растворителей.

Основные теории температурной зависимости кавитационного разрушения могут быть сведены к следующему.

Ряд авторов (Бебчук, Шамб) считают, что при возрастании температуры растворимость газов в жидкости уменьшается, вследствие чего газы выделяются из раствора, что приводит к увеличению количества кавитационных пузырьков на единицу объема жидкости. С другой стороны, увеличение температуры ведет к повышению упругости насыщенных паров жидкости, в результате чего уменьшается интенсивность образующейся при захлопывании кавитационного пузырька ударной волны. Эти два противоположных фактора и вызывают максимум кавитационного разрушения.

Хиклинг, соглашаясь, что уменьшение кавитационного разрушения после точки максимума, определяется влиянием дальнейшего повышения упругости насыщенного пара жидкости, выдвигает другую гипотезу наличия экстремальной зависимости кавитационного разрушения от температуры.

Исходя из диаграммы - жидкость + лед при различных температурах и высоких давлениях, он высказывает предположение, что при больших давлениях, образуемых при захлопывании кавитационного пузырька (порядка десятков тысяч атмосфер) в пределах температуры от нуля до 50°C возможно образование в слоях жидкости прилегающих к полости частичек льда. Причем, с повышением исходной температуры воды количество образовавшегося льда уменьшается и при 50°C и выше отсутствует вообще.

Хиклинг подсчитал размеры частичек льда и время их жизни соответственно и делает вывод, что уменьшение кавитационной эрозии с понижением температуры от 50°C объясняется льдообразованием имеющем место при захлопывании полости. В результате увеличивается плотность жидкости (вследствие того, что образующийся в данных условиях лед имеет удельный вес больше удельного веса воды), что и приводит к снижению интенсивности ударных волн.

Фрид полностью не соглашается с Бебчуком и Шамбом и выдвигает иное объяснение. Исходя из гипотезы кавитационного разрушения материалов вследствие наличия трещин и пор на его поверхности (см. выше), автор считает, что максимум кавитационного разрушения при изменении температуры жидкости, можно объяснить тем, что при повышении температуры уменьшается давление воздуха, находящегося в порах и трещинах. Поэтому при наложении мгновенного давления (автор имеет в виду давление, возникающее в жидкости при захлопывании кавитационной полости) можно добиться более высоких степеней сжатия воздушного объема в поре или трещине.

Так как, по мнению Фрида, упомянутый процесс сжатия воздуха носит адиабатический характер, то при более высоких степенях сжатия в порах и трещинах будет иметь место и более высокая температура. Вследствие этого усиливаются эффекты коррозии и эрозии. С другой стороны, с понижением давления воздуха, находящегося в микротрещинах и порах, при повышении температуры уменьшается его масса, вследствие чего эффекты коррозии и эрозии уменьшаются. Эти два противоположных фактора и дают, по мнению автора, определенный температурный максимум для кавитационного разрушения материалов.

Наиболее важным в исследовании Бебчука является вывод, что максимум кавитационного разрушения имеет место при температуре, когда давление насыщенного пара жидкости составляет 35...80 мм ртутного столба, что соблюдается для всех исследованных автором жидкостей.

Кавитационное разрушение в воде было значительно больше, чем в органических растворителях. Так, максимум кавитационного разрушения в воде в 7 раз превышает максимум эрозии в спирте и четыреххлористом углероде. Розенберг и Бебчук объясняют этот факт растворимостью газа в жидкости. Так растворимость газа в четыреххлористом углероде и спирте на несколько порядков выше растворимости их в воде.

Наряду с меньшей растворимостью добавляет Флин вода имеет теплопроводность в 3 раза больше, чем этиловый спирт и в 7 раз больше, чем четыреххлористый углерод. По мнению Флина, это будет способствовать тому, что тепло будет больше отводиться от захлопывающейся кавитационной полости, что будет несколько приближать термодинамический процесс сжатия парогазовой смеси к изотермическому. А при изотермическом процессе, как показали Хиклинг и Плессет ударная волна при захлопывании полости будет больше.

Сиротюк считает, что повышение температуры приводит к уменьшению интенсивности ударных волн, образующихся при захлопывании кавитационных пузырьков. Наличие максимума эрозии в зависимости от температуры в опытах Бебчука он объясняет тем, что при повышении температуры увеличивается зона кавитации. Поэтому если образец, подвергающийся кавитационному разрушению, имеет размер, превышающий зону кавитации, то повышение температуры может вначале привести к возрастанию кавитационной эрозии, вследствие увеличения площади кавитационного воздействия, а затем, когда интенсивность ударной волны

сильно упадет, к ее уменьшению. Как утверждает автор, размеры образцов, подвергавшихся разрушению в опытах Бебчука, были больше, чем зона кавитации.

#### **5.1.4 Интенсивность звукового поля**

Как показали экспериментальные исследования Розенберга Л. Д. и Сиротюка М.Г. с возникновением кавитации и развитием её при повышении амплитуды преобразователя излучаемая акустическая интенсивность сначала растет, затем рост ее замедляется и приостанавливается на уровне 1,5 Вт/см<sup>2</sup>.

Исследования проводились при возбуждении кавитации в воде при помощи магнитострикционного преобразователя на частоте 21 кГц.

Полученный результат авторы связывают с тем, что при росте интенсивности колебаний на преобразователе растет число кавитационных пузырьков в жидкости, вследствие чего увеличивается «рыхлость» среды и уменьшается ее акустическое сопротивление. Уменьшение же акустического сопротивления среды препятствует возрастанию величины эффективного звукового давления.

Этого же мнения придерживается Непайрас, который уточняет, что оптимум интенсивности звукового поля в диапазоне частот от 20 до 50 кГц, при котором наблюдается максимальная кавитационная эрозия, составляет 2...3 Вт/ см<sup>2</sup> для воды и водных растворов и 1,5...2,0 Вт/ см<sup>2</sup> для большинства органических растворителей.

Образцов приводит выражение, связывающие интенсивность волн давления, образующихся при захлопывании кавитационной полости и интенсивность звука.

$$I = BN^{\frac{2}{3}} J_0 I^{-(\lambda_1 + DN\lambda)x}$$

(5.24)

где В и D - постоянные;

N- число полостей в единице объема рабочей жидкости;

J0 - интенсивность звука на поверхности излучателя;

$\lambda_1$  - коэффициент поглощения звука жидкостью;

$\lambda_0$  - коэффициент поглощения звука за счет наличия в жидкости полостей при

N=1;

I - интенсивность волн давления, излучаемых полостями у поверхности твердого тела;

x- расстояние между источником звука и твердым телом.

Рассматривая число полостей N как функцию интенсивности звука в среде, автор, подвергнув анализу производную, получил, что последняя проходит через максимум. Исходя из этого, автор сделал вывод, что увеличение интенсивности звука не всегда приводит к увеличению звуковой эрозии. Могут быть случаи, когда увеличение интенсивности звука приводит к обратному эффекту.

В заключение необходимо отметить, что, как показано опытами Розенберга, при интенсивностях звука выше 5 Вт/ см<sup>2</sup> для воды и водных растворов вновь наблюдается увеличение кавитационного воздействия. Последнее объясняется тем, что число кавитационных пузырьков, образующихся в единице объема, достигает насыщения и больше не увеличивается при возрастании интенсивности звука.

### 5.1.5 Статическое давление

Эффективный способ повышения интенсивности кавитационного разрушения в звуковом поле предложили Агранат Б.А., Башкиров В.И., Израйлович Я.И., Китайгородский Ю.И. и Кутузов А.В. Авторами разработан принципиально новый метод интенсификации ультразвуковой кавитации за счет одновременного повышения интенсивности ультразвука на преобразователе и увеличения статического давления в жидкости.

Представленное авторами экспериментальное подтверждение предложенного ими метода показывает, что при использовании типового преобразователя ПМС-6М, кавитационное разрушение увеличивается более чем в 20 раз при избыточном статическом давлении 5 атм. При значительном увеличении звукового давления до 40...50 атм. и одновременном увеличении статического давления до 10...15 атм. кавитационная эрозия возрастает на 2-3 порядка.

Повышение кавитационного разрушения при избыточном статическом давлении авторы объясняют тем, что при увеличении статического давления уменьшается минимальный радиус  $R_{\min}$  достигаемый пузырьком при сжатии, а уменьшение  $R_{\min}$  в конечной стадии сжатия значительно увеличивает действие сил поверхностного натяжения, что способствует повышению радиальной скорости полости в момент ее захлопывания. В полупериод растяжения при повышенном статическом давлении уменьшается величина максимального радиуса  $R_{\max}$ . Однако, снижение интенсивности, вызванное уменьшением  $R_{\max}$ , с избытком компенсируется повышением интенсивности из-за уменьшения  $R_{\min}$ .

Метод интенсификации кавитационного разрушения при избыточном статическом давлении исследован также в работах Сиротюка М.Г. Автор считает, что увеличение интенсивности кавитации при избыточном гидростатическом давлении происходит из-за уменьшения газосодержания



кавитационных полостей вызванное возрастанием растворимости воздуха, находящегося в зародышах кавитации в жидкости.

По мнению автора, увеличению интенсивности ударных волн способствует также повышение скорости захлопывания кавитационных полостей под действием гидростатического давления. Интенсивность ударных волн автор оценивал по кавитационной эрозии образца, помещенного в фокальное пятно ультразвукового концентратора, работающего на частоте 560 кГц при гидростатическом давлении до 70 атм.

Автор указывает, что кавитационная эрозия при 30 атм. возросла по сравнению с нормальными условиями в 200 раз.

Изучению влияния избыточного статического давления на процесс ультразвуковой кавитации посвящена также работа Финча. Автор оценивал интенсивность кавитации по яркости люминесценции. В работе указывается, что для каждой интенсивности звука имеется определенная величина статического давления, при котором яркость люминесценции наибольшая.

Автором отмечено, что при снятии избыточного статического давления кривая яркости люминесценции не совпадает с кривой, полученной при повышении статического давления.

При снятии давления наибольшая яркость имеет место при более высоких значениях гидростатического давления, Кроме того, в этом случае, яркость

люминесценции выше оптимального значения, полученного при повышении гидростатического давления.

## **5.2 Актуальность проблемы сверхтонкого диспергирования.**

### **Способ повышения эффективности ультразвукового диспергирования**

Проблема сверхтонкого диспергирования твердых материалов является актуальной для ряда отраслей техники.

В процессах порошковой металлургии введение в порошок основного спекаемого материала добавок высокодисперсных тугоплавких окислов повышает механические свойства получаемого продукта. Так, введение в спекаемый порошок хрома нескольких процентов высокодисперсного порошка окиси магния (0,02-0,04) повышает жаростойкость изделий в 3-4 раза, а сопротивление коррозии становится выше, чем у хромоникелевых сталей.

В машиностроении важная роль отводится высокодисперсным твердым смазкам, одной из составляющих которых является тонкодисперсный дисульфид молибдена. Тонкодисперсный порошок двуокиси циркония используется в производстве электрических контактов.

Диспергирование твердых материалов производится в настоящее время различными методами, основанными на механических, термических и электрохимических методах измельчения. Однако, все существующие методы позволяют получать порошки с размерами частиц около микрона или десятых долей микрона, что недостаточно, в частности, для указанных выше целей, где наибольший эффект достигается при размерах частиц, измеряемых сотыми долями микрона.

Весьма перспективным является ультразвуковой способ измельчения, основанный на кавитационном разрушении твердых тел.

Опубликован ряд работ по исследованию воздействия ультразвука на процессы диспергирования в жидкой среде. При этом высказываются самые различные мнения о влиянии на процесс диспергирования отдельных технологических факторов.

Гайнс диспергировал углерод в воде, ацетоне и четыреххлористом углероде и каолин в воде, используя звуковые колебания частотой 8,5 кГц. Как отмечает автор, полученные золи были устойчивы.

Ржевкин и Островский, используя пьезокварцевый излучатель на частоте 500 кГц диспергировали в воде ртуть, серу, олово, висмут, свинец, медь, серебро. При этом были получены в высокодисперсном состоянии олово, свинец и висмут с размерами частиц до 10<sup>6</sup> см.

Клаус и Шмидт провели количественные исследования диспергирования свинца, железа и серебра. Как показали авторы, число и степень дисперсности частиц металла тем больше, чем больше интенсивность ультразвука и длительность его воздействий. Чем мельче исходный размер частиц, подвергаемых ультразвуковому диспергированию, тем меньше размеры получаемых частиц.

Островский, применяя магнитострикционный излучатель диспергировал свинец в воде и 5% водном растворе сахара, а также в вазелиновом масле. Наилучшие результаты были получены в воде, наихудшие - в вазелиновом масле. Причем, в последнем случае - в 5 раз хуже, чем в воде.

Золнер на основании собственных опытов подвергает сомнению результаты Ржевкина и Островского. Золнер обнаружил, что чистые металлы в виде монолита, вообще, не диспергируются. Отмеченные другими исследователями факт диспергирования он связывает с разрушением слоя окиси, которым покрыто большинство металлов в жидкости. Золнер считает, что об истинном диспергировании твердого вещества можно говорить лишь в том случае, если твердое тело диспергируется после шести или семи повторных облучений в чистой, все время сменяемой воде. У автора сравнительно легко диспергировались смола, гипс, железный блеск, сера и графит. Для предотвращения коагуляции частиц, при озвучивании, автор рекомендует добавлять немного слабого электролита, например, гидроокись аммония.

Соловьева исследовала диспергируемость меди, алюминия, никеля, олова, латуни, золота, кадмия, магния, цинка, висмута и свинца в воде, в вазелиновом масле и в воде с добавкой олеоната натрия. Для целей диспергирования использовался пьезокварцевый излучатель с частотой 400 кГц. Как указывает автор, металлы с меньшей твердостью, как кадмий, магний, олово, висмут и свинец диспергируются лучше. Причем, под твердостью тела, автор понимает работу, необходимую для образования единицы новой поверхности данного тела в процессе его диспергирования.

В вазелиновом масле медь, алюминий, платина, золото, никель, олово и цинк совсем не диспергировались, а висмут, свинец, кадмий диспергировались плохо. При диспергировании свинца в вазелиновом масле введение добавок поверхностно активных веществ повышает диспергируемость, а при диспергировании в воде - понижает.

Матье-Зиго и Левавассер диспергировали сульфат бария в воде. Было найдено, что после определенного времени воздействия наблюдается насыщение и дальнейшее диспергирование невозможно.

Эти же исследователи изучали диспергирование каолина в воде, используя частоты от 192 до 1600 кГц. Как показали авторы, лучшая дисперсность для каолина получается на частоте 960 кГц.

Гартнер исследовал процесс диспергирования карбоната магния, свинца, бария и сульфата бария под действием ультразвука частотой от 70 до 1500 кГц. Оптимальные результаты были получены при частоте 500 кГц и концентрациях около 0,002 г/см<sup>3</sup>.

Кроме того, было показано, что диспергирование сильно зависит от формы кристаллов вещества. Чем более правильную форму имеет кристалл, тем более он устойчив по отношению к воздействию ультразвуковых волн. Кристаллы с дефектами поверхности легко разрушаются.

Фридман проводил исследования по диспергированию сернокислого бария, окиси алюминия на частотах 22, 500 и 1000 кГц. По мнению автора, наиболее эффективной для диспергирования является частота 22 кГц.

Косолапов исследовал зависимость скорости диспергирования двухсернистого молибдена от температуры, времени озвучивания и статического давления. По данным автора, максимальная скорость диспергирования достигается при температуре 50° С.

Капустин проводил опыты по диспергированию лития, калия, натрия в вакуумном масле и керосине на частотах 25 кГц и 70 кГц. Опыты показали,

что на частоте 25 кГц эффективность диспергирования вещества выше, чем при 70 кГц.

Гринберг и Наишуллер диспергировали окись магния в четыреххлористом углероде при частоте ультразвуковых колебаний 16 кГц. Авторы указывают, что наилучшая дисперсность имеет место после 3,5-4 часов озвучивания.

Из вышеприведенного обзора видно, что существуют самые различные соображения о необходимых условиях диспергирования.

Опубликованные материалы в большинстве случаев не выходят за пределы лабораторных исследований. Отсутствуют рекомендации по широкому технологическому применению предложенных режимов и методов ультразвукового диспергирования. Это связано с тем, что интенсивность ультразвукового воздействия в указанных установках была невелика и не могла обеспечить ультразвуковой обработки объема материала за короткое время.

Механизм диспергирования материалов в ультразвуковом поле обусловлен целым рядом явлений, главными из которых являются кавитация и гидротоки, возникающие в рабочем объеме жидкости. При захлопывании кавитационных полостей в жидкости возникает волна сжатия максимальная амплитуда, которой, как показывают расчеты, изложенные в главе 2, может достигать значений несколько тысяч атмосфер.

Так как после волны сжатия всегда следует волна разрежения, то на частицы, находящиеся в жидкости, будут действовать растягивающие напряжения, которые, по-видимому, и приводят к их разрушению. Но интенсивность кавитационного воздействия ослабевает с увеличением

расстояния от излучателя вследствие рассеивания и поглощения ультразвуковой энергии.

Поэтому, большую роль в процессе диспергирования играют гидропотоки, которые способствуют интенсивному перемешиванию частиц в объеме жидкости. Скорости гидропотоков, как показали исследования, проведенные в ультразвуковой лаборатории Московского института, стали и сплавов, могут достигать значений 100 см/сек. и определяются интенсивностью кавитации. С возрастанием интенсивности кавитации скорость гидропотоков увеличивается, что наблюдалось, также, в работе. Агранат Б.Л., Башкиров В.И. и Китайгородский Ю.И. проведенными в последнее время исследованиями показали, что можно значительно увеличить эффективность ультразвукового воздействия на процессы, протекающие в жидкостях, если увеличивать статическое давление в рабочем объеме жидкости при одновременном увеличении амплитуды звукового давления.

Это дает основание полагать, что при использовании избыточного статического давления будет также возрастать эффективность процесса ультразвукового диспергирования.

Для проведения экспериментальных исследований по диспергированию материалов под избыточным статическим давлением была разработана специальная аппаратура, описание которой приводится в п.3.2.

### **5.3 Разработка сплавов с повышенной кавитационной износостойкостью**

#### **5.3.1 Актуальность проблемы**

При длительной работе ультразвуковых диспергаторов, в рабочую камеру которых подается избыточное статическое давление, наблюдается разрушение стенок аппарата и особенно его излучателя.

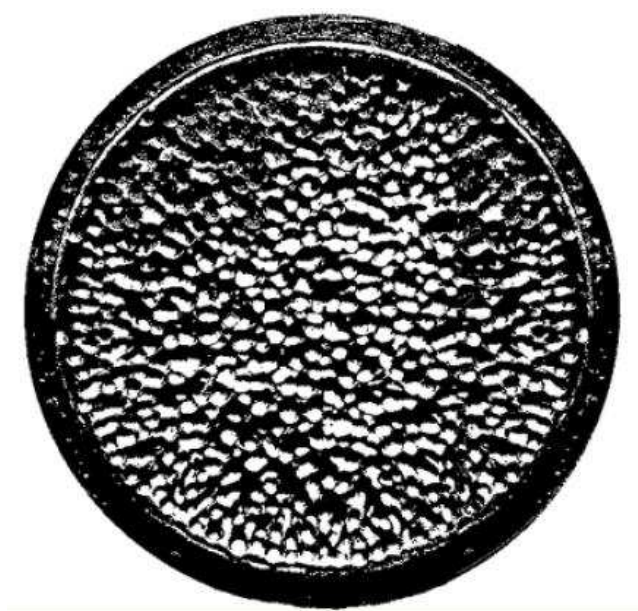


Рисунок 10 - Торцевая поверхность излучателя поршневого ультразвукового диспергатора из стали 1X18H9T после 100 час работы

В настоящее время при выборе материалов для излучателей исходят из их коррозионной стойкости и акустических свойств. Вопросу же кавитационной стойкости не уделяется достаточного внимания.

Так, например, в серийных ультразвуковых преобразователях серии ПМС диафрагмы излучателей изготовлены из нержавеющей стали 1X18H9T, которая по данным работ имеет низкую кавитационную стойкость. Это, вероятно, объясняется тем, что в большинстве серийных ультразвуковых аппаратах интенсивность кавитации невелика и проблема кавитационно-стойкого материала не стояла так остро.

Однако, использование избыточного статического давления значительно повысило интенсивность кавитации, и поэтому выбор кавитационно-стойкого материала стал первоочередной задачей.



Цель исследований, изложенных в настоящем разделе диссертации, состояла в выборе кавитационностойкого материала пригодного для изготовления деталей ультразвуковых диспергаторов, работающих в режиме интенсивной кавитации.

### **5.3.2 Кавитационная эрозия и факторы ее обуславливающие. Роль структуры сплава.**

Существует несколько гипотез о природе кавитационного разрушения. Многочисленными исследованиями было установлено, что в кавитационной зоне поверхность металла подвергается механическому, коррозионному, электрическому и тепловому воздействию. Однако металлографический и рентгеноструктурный анализ показал, что главным фактором является механическое воздействие.

Так, металлографическим методом была обнаружена пластическая деформация поверхностного слоя, а рентгеновским анализом выявлены изменения в структуре металлов, которые обуславливаются наклепом. О наклепе свидетельствует также повышение микротвердости сплавов на первых этапах кавитационного воздействия.

Ряд авторов пытались выяснить причины появления пластической деформации и наклепа металлов при кавитации. Л.А.Гликман дает следующее представление о физической природе кавитационного воздействия: " Каждый гидравлический удар (под гидравлическим ударом автор понимает механическое воздействие на поверхность металла вследствие захлопывания одиночного кавитационного пузырька) охватывает очень малую область. Зона максимальных напряжений в этой области соизмерима с размерами отдельных структурных составляющих. Величина

напряжений значительна и превышает уровень предела текучести. Гидравлические удары приводят к пластической деформации, наклепу поверхности. Толщина наклепанного слоя соизмерима с размерами зоны действия максимальных напряжений и растет со временем. В пределах этой толщины начинается кавитационная эрозия, распространяющаяся в глубину".

Теория микроударного воздействия получила дальнейшее развитие в работах Богачева Н.И. и Минца Р.И. Исследованиями было установлено, что при кавитационной воздействию, напряжения, возникающие в результате захлопывания кавитационных пузырьков, приходятся на относительно малую площадь поверхности металла. Кавитационная стойкость металлов и сплавов, по данным авторов, определяется свойствами микроскопических объемов, т.е. прочностью отдельных структурных составляющих.

Особенно влияет на кавитационную стойкость металла и сплава его природа и структура. Различные фазы и структурные составляющие по-разному воспринимают пластическую деформацию, по-разному упрочняются. Поэтому при выборе кавитационно-стойкого сплава, как указывают авторы, обязательно надо учитывать структуру сплава и способность отдельных структурных составляющих противостоять кавитационному воздействию.

Изучение поведения сплавов при воздействии кавитации без учета структурных особенностей позволило ряду авторов утверждать о существовании зависимости между кавитационной стойкостью и механическими свойствами сплавов – твердостью, пределом прочности, ударной вязкостью отношением предела прочности к пределу текучести.

Другие исследователи считают, что зависимости между твердостью и кавитационной стойкостью нет, а если и есть, то только в однотипных системах, находящихся в одинаковом структурном состоянии.

Обоснование положения, что механические свойства металла или сплава не могут служить критерием оценки его кавитационной стойкости, изложено в работе, где авторы указывают, что механические свойства – усредненные характеристики материала, в то время как кавитационная стойкость материала зависит от механических свойств отдельных структурных составляющих.

Различие во взглядах авторов по-видимому вызвано тем, что в приведенных работах не учитывалось соотношение между размерами зерен и размерами максимально напряженных при эрозии областей. Макромеханические свойства (предел прочности, предел текучести твердость и т.д.) отражают сопротивление металлов и сплавов разрушению лишь в том случае, если в процессе нагружения размеры максимально напряженных зон более чем в 10 раз превосходят размеры областей структурной неоднородности (зерен). Поэтому следует полагать, что макромеханические свойства могут характеризовать кавитационную стойкость только достаточно мелкозернистых материалов.

Таким образом, исходя из вышеизложенного, можно считать, что при выборе кавитационностойких материалов следует исходить из структуры сплава и отдавать предпочтение тем материалам, которые характеризуются высокой прочностью отдельных структурных составляющих, т.е. высоким сопротивлением микрообъемов пластической деформации при микроударном воздействии.

### **5.3.3 Алюминиевые бронзы - кавитационно-стойкий материал**

Из литературы известно, что алюминиевые бронзы находят широкое применение в аппаратах и конструкциях, где требуется высокая стойкость материалов к кавитационному износу.

Кроме того, алюминиевые бронзы имеют достаточные упругие свойства, что указывает на возможность их применения для изготовления излучателей магнитострикционных преобразователей,

Ниже приводятся, заимствованные из последней работы, некоторые данные по свойствам алюминиевых бронз.

Плотность - 8,5 г/см<sup>3</sup>

Скорость звука - 4070 м/сек Предел выносливости (усталости)

при циклической переменной нагрузке - 18,5 кг мм<sup>2</sup>

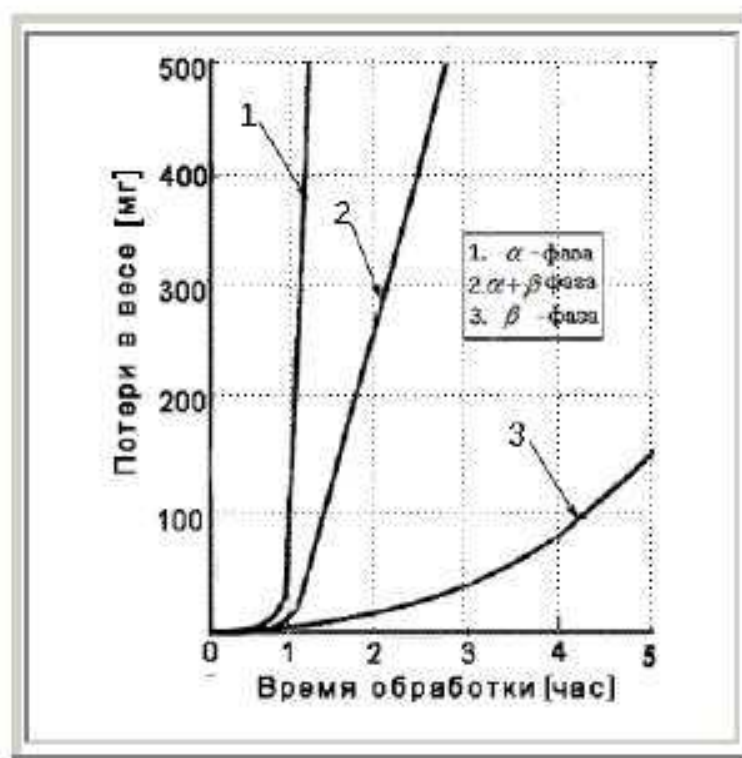
Максимально возможная скорость смещения частиц материала - 1680 см/сек.

Из анализа приведенных значений следует, что предел выносливости алюминиевых бронз (т.е. наибольшее максимальное напряжение цикла, при осевом нагружении, при котором материал не разрушается при практически неограниченно большем числе перемен напряжений) равен аналогичному показателю большинства конструкционных сталей, анализ свойств которых имеется в работе.

Не уступая значительно сталям по упругим свойствам, алюминиевые бронзы значительно превосходят их по кавитационной стойкости. Так в работе указывается, что литые отожженные алюминиевые бронзы с содержанием алюминия 11,6% и 12,5 % превосходят кавитационную стойкость стали 1Х13 в 4,3 и 7,0 раз соответственно.

Еще более высокую кавитационную стойкость имеют закаленные алюминиевые бронзы. Так согласно вышеупомянутой работе В.В Гавранека, алюминиевые бронзы в закаленном состоянии в 2,5-3 раза превосходят по кавитационной стойкости алюминиевые бронзы в литом или отожженном состоянии. Аналогичный вывод получен в совместной работе М.В. Степановой, Б.А. Аграната и В.И. Башкирова.

Полученные результаты можно объяснить, используя соображения, изложенные в работе. Сплавы на медной основе представлены двумя основными группами: это  $\alpha$  - фазные и  $\beta$  - фазные сплавы. Кроме того, имеются еще обширная группа сплавов, состоящая из смеси этих двух фаз ( $\alpha + \beta$ ) либо  $\alpha$  продукты распада  $\beta$  - фазы. Каждая из этих структурных составляющих обладает различными механическими свойствами  $\alpha$ - фаза относительно мягкая, пластичная характеризуется низкими значениями сопротивлению отрыву и предела текучести,  $\beta$ - фаза более твердая, менее пластичная. Разрушение двухфазной структуры всегда начинается на границе фаз и идет в сторону более слабой фазы. Поэтому увеличение количества фазы в сплаве приводит к снижению его стойкости и наоборот увеличение количества фазы повышает сопротивление сплава разрушению.



1- $\alpha$  фаза; 2-  $\alpha + \beta$  фаза; 3-  $\beta$  фаза

Рисунок 11 - Потери в весе бронз БрАМц9-2 различного фазового состава в зависимости от времени испытания на кавитационную стойкость

Как видно из рисунка исследуемый сплав обладает наименьшей стойкостью в  $\alpha$ - фазном состоянии. Наибольшая стойкость наблюдается для  $\beta$ - фазы, а структура, состоящая из смеси этих фаз, занимает промежуточное положение. Измерение поверхностной твердости от времени испытания показало, что наибольшей способностью к упрочнению обладает. Аналогичные результаты получены и для других сплавов.

Если рассмотреть равновесную диаграмму состояний Cu-Al, то видно, что бронзы с содержанием алюминия менее 9,8% являются однофазными, состоящими из  $\alpha$ - раствора и, следовательно, имеют малую кавитационную стойкость. Дальнейшее повышение содержания алюминия приводит к

появлению  $\beta$ - фазы и бронза с содержанием алюминия 12% является полностью  $\beta$  фазной.

Но  $\beta$ - твердый раствор в алюминиевой бронзе не существует при комнатной температуре. Уже при температуре 565°C  $\beta$ -твердый раствор претерпевает эвтектоидное превращение по схеме



Если же применить закалку для сплавов с содержанием алюминия 10...16%, то как следует из диаграммы метастабильных состояний сплавов Cu-Al для больших скоростей охлаждения в воде  $\beta$ - раствор при содержании алюминия до 12,8% образует - фазу, в области с содержанием алюминия 12,8...13,3% образует фазу, а при содержании алюминия 13,3% и выше - фазу - фаза носит название превращенной  $\beta$ - фазы. Эта фаза отличается от обычной  $\beta$ - фазы только тем, что имеет пластинчатую форму, но сохраняет все механические свойства  $\beta$ - фазы.

Таким образом, применяя закалку в алюминиевых бронзах с содержанием алюминия 9,8...12,8% можно вместо  $\alpha$  - фазных бронз получить более кавитационно-стойкие  $\beta$ - фазные бронзы.

В работе было показано, что наиболее кавитационно-стойкими из всех алюминиевых бронз являются сплавы эвтектоидного состава (с содержанием алюминия 11,8...12,3 %).

Однако еще больше увеличить кавитационную стойкость алюминиевых бронз вышеупомянутого состава можно, если применять наряду с закалкой легирование их другими элементами.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Произведена отладка работы, имеющийся экспериментальной установки с целью получения надежных, достоверных экспериментальных результатов.

Получены результаты, подтверждающие корректность работы установки.

Рассмотрены возможные направления и перспективы для использования установки при исследовании прочностных свойств конструкционных материалов, а также в качестве опреснительной установки.

Используя данную установку и предложенные методы можно без особых затрат расширить границы использования насосного оборудования, что позволит расширить спектр технологических задач, возникающих при эксплуатации данного оборудования, уменьшить вероятность отказов за счет исключения областей, в которых насос работает неудовлетворительно.

Использование полученных данных может облегчить и улучшить работу многих отраслей производства от электростанций до нефтеперерабатывающей промышленности.



## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 Арзуманов Э.С. Кавитация в местных гидравлических сопротивлениях, М., «Энергия», 1978, 302 с.
- 2 Кулагин, В. А. Гидрофизика / В. А. Кулагин, Б. Ф. Турутин, А. И. Матюшенко. ИПЦ КГТУ – Красноярск ИПЦ КГТУ, 2000. – 243 с.
- 3 Таблицы физических величин. Справочник. Под ред. акад. И. К. Кикоина. – М.: Атомиздат, 1976.
- 4 Акуличев, В. А. Кавитация в криогенных и кипящих жидкостях / В. А. Акуличев. – М.: Наука. 1978. – 280 с.
- 5 Букатый, В. И. Измерение физико–химических характеристик воды при различных физических воздействиях с учетом переходных процессов / В. И. Букатый, П. И. Нестерюк // Ползуновский вестник. – 2010. – № 2. – С. 60–65.
- 6 Cini R. / Acqua Ind. 1962. – № 18.
- 7 Кулагин, В. А. Методы и средства технологической обработки многокомпонентных сред с использованием эффектов кавитации / В. А. Кулагин // Дисс. ... докт. техн. наук. - Красноярск, 2004. – 379 с.
- 8 Кулагин, В. А. Изучение кинетики получения ультрадисперсных алмазов с помощью вибрационной (ультразвуковой) и гидродинамической кавитации / В. А. Кулагин, В. Л. Королев // Вестник КГТУ. Красноярск: КГТУ. – 1997. – № 8. - С. 61–66.
- 9 Седов, Л. И. Механика сплошной среды / Л. И. Седов. - М.: Наука, 1973. - Т. 1 и 2. – 536 с., 584 с.
- 10 Кнепп, Р. Кавитация / Р. Кнепп, Д. Дейли, Ф. Хеммит. - М.: Мир, 1974. – 678 с.
- 11 Липсон, А. Г. Выход DD–реакции в процессе электрического пробоя кавитационных пузырьков в диэлектрических дейтерированных жидкостях / А. Г. Липсон, В. А. Кузнецов, Дж. Майли // Письма в ЖТФ. – 2004. – Т. 30. – № 10. – С.39–45.

12 Арзуманов Э. С., Ловцов Е. Н. Использование акустического эффекта при исследовании кавитации в регулирующих клапанах. «Труды института НИИавтоматика», 1968, вып. 36

13 Витенько, Т. Н. Механизм активирующего действия гидродинамической кавитации на воду / Т. Н. Витенько, Я. М. Гумницкий // Химия и технология воды. – 2007. – Т. 29. – № 5. – С. 422–432.

14 Криволицкий, А. С. Изменение физико-химических свойств воды под воздействием гидродинамической кавитации / А. С. Криволицкий, В. А. Кулагин // Социальные проблемы инженерной экологии, природопользования и ресурсосбережения: мат-лы НПК. – Красноярск: ИПЦ КГТУ, 2003. – С. 61-74.

15 Криволицкий, А. С. Релаксация физико-химических свойств воды, прошедшей обработку гидродинамической кавитацией / А. С. Криволицкий, В. А. Кулагин // Социальные проблемы инженерной экологии, природопользования и ресурсосбережения: мат-лы НПК. – Красноярск: ИПЦ КГТУ, 2003. – С. 22-29

16 Криволицкий, А. С. Влияние масштабных факторов при различных режимах кавитационной обработки воды / А. С. Криволицкий, В. А. Кулагин // Вестник ассоциации выпускников КГТУ, Красноярск. – 2010. – Вып. 19. – С. 70-75.

17 Евстигнеев В. В. Кавитация в технологиях очистки сточных вод. / В. В. Евстигнеев, В. А. Кулагин // В мире научных открытий. 2010. - № 5 (11). Ч. I. – С. 87-90;

18 Федоткин, И. М Кавитация, кавитационная техника и технология, их использование в промышленности / И. М. Федоткин, И. С. Гулый. - Киев: АО «ГЛАЗ», 2000. – Ч. 2. – 898 с.

19 Есиков, С. А. Гидродинамические характеристики суперкавитирующего реактора с пространственной системой ассиметричных кавитаторов / С. А. Есиков // Гидродинамика больших скоростей. - Красноярск: КрПИ. - 1978. – С. 27–36.

20 Немчин, А. Ф. Исследование гидродинамических характеристик суперкавитирующих насосов: Автореф. дис. канд. техн. наук./ А. Ф. Немчин – Киев, 1979. – 24 с.

21 Промтов М.А. Технологии импульсного энергетического воздействия на нефть и нефтепродукты. // Экологический вестник России. 2011, №3. - С. 14-16.

22 Великодный В.Ю., Крикунова А.И. Исследование влияния кавитационных и электроразрядных процессов на реологические свойства высоковязких нефтепродуктов / XXXVIII Международная (Звенигородская) конференция по физике плазмы и УТС, 14 – 18 февраля 2011 г.

23 Кулагин, В. А. Повышение энергоэффективности водоподготовки на ТЭС и котельных с использованием кавитационной технологии / В. А. Кулагин, А. С. Криволицкий // Энергосбережение и водоподготовка. – 2007. – № 4. – С. 85–88.

24 Кулагин, В. А. Суперкавитационный миксер / В. А. Кулагин // Гидродинамика больших скоростей: Межвузовский сборник. - Красноярск: КрПИ, 1992. – С. 134–140.

25 Зажиганов, Л. С. Методы планирования и обработки результатов физического эксперимента / Л. С. Зажиганов, А. А. Кишьян, Ю. И. Романников. - М.: Атомиздат, 1978. – 231 с.

26 Зайдель, А. Н. Ошибки измерений физических величин / А. Н. Зайдель. - Л.: Наука, 1974. – 108 с.

27 Налимов, В. В. Теория эксперимента / В. В. Налимов. - М.: Наука, 1971. – 208 с.

28 Шенк Х. Теория инженерного эксперимента / Х. Шенк. - М.: Мир, 1972. – 170 с.

29 Chen, B. Hydrogen bonding in water / B. Chen, I. Ivanov, M. L. Klein, M. Parrinello // Phys. Rev. Lett. – 2003. – V. 91(21). – 215503.

30 Зенин, С. В. Структурно–информационные представления о состоянии водной среды / С. В. Зенин // Вестник РАЕН. – 2010. –№ 3. – С. 56–63.

- 31 Антонченко, В. Я. Основы физики воды / В. Я. Антонченко, А. С. Давыдов, В. С. Ильин. - Киев: Наукова думка, 1991. – 669 с.
- 32 Зацепина, Г. Л. Физические свойства и структура воды / Г. Л. Зацепина. - М.: изд-во Московского университета, 1998. – 185 с.
- 33 Plumridge, T. H. Water structure theory and some implications for drug design / T. H. Plumridge, R. D. Waigh / J. Pharm. Pharmacol. – 2002. – V. 54. – № 9. – P. 1155–1179.
- 34 Colson, S. D., Dunning Jr. T.H. Science, 1994. - V. 265, 5168. - P. 43.
- 35 Kusalik, P.G. The spatial structure in liquid water / P. G. Kusalik, I. M. Svishchev // Science. – 1994. – V. 265. – № 5176. – P. 1219.
- 36 Горшков А. С., Русецкий А. А. Кавитационные трубы. Л., «Судостроение», 1972. 192 с.
- 36 Бахолдин И.Б. Бездиссипативные разрывы в механике сплошной среды. М., «Физматлит», 2004, 318 с., JSB №5-9221-0546-9.
- 37 Башта Т. М. и др. Объёмные гидравлические приводы. Под ред. Т. М. Башта, М., «Машиностроение», 1968, 628 стр.
- 38 Bertholet M. Sur quelques phenomenes de dilatation forcee des liquids. Ann.de Chimie et de Physique, 30,322 et Seq.,1850.
- 39 Davies R.M. и др. The tensile strength of liquids under dynamic stressing, Proc. 1955 NPL Symp. on cavitation in hydrodynamics, Paper 5, 1956.
- 40 Dixon H.H. Note on the tensile strength of water, Sci. Proc. Royal Dublin Soc.,12 (N.S.), 1909.
- 41 Кнэпп Р., Дейли Дж., Хэммит Ф. Кавитация. Пер. с англ., М., «Мир».1974.
- 42 Ламекин Н.С. Кавитация: теория и применение, Государственная национальная русская академия, М., «Русак», 2000, 246 с.
- 43 Смородов, Е. А. Физика и химия кавитации / Е. А. Смородов, Р. Н. Галиахметов, М. А. Ильгамов - М.: Наука, 2008. - 226 с.
- 44 Перник А. Д. Проблемы кавитации. Л., «Судостроение», 1966. 440 с.

- 45 Пешкин М. А. Кавитационные характеристики местных сопротивлений трубопроводов. — «Теплоэнергетика», 1960, №12, с. 59—62.
- 46 Рахматулин Ш. И., Колпаков Л. Г. К вопросу о выборе давления паров при кавитации нефтей. — «Транспорт и хранение нефти и нефтепродуктов», 1971, № 8, с. 58—61.
- 47 Физический энциклопедический словарь. М., «Советская энциклопедия», 1960, т. I, с. 664.
- 48 Шальнев К. К. Кавитация в гидродинамике. — «Известия АН СССР. ОТН», 1956, № 8, с. 10—92.
- 49 Minelli G. Sulla determinazione de la pressione di formazione di vounti nei liquide. — «Technica italiana», 1967, vol. 32, № 11, p. 763—768
- 50 Ress E. P., Trevena D. H. The effects of temperature and viscosity on the critical tensions of liquids. — «Cavitation Forum», Chicago, 1967, May 8, p. 1—3.
- 51 Ивченко В. М. Кавитационная технология / Ивченко В. М., Кулагин В. А., Немчин А. Ф. // ред. акад. Г. В. Логвинович. - Красноярск: Изд-во КГУ, 1990. – 200 с.
- 52 Назаров Г. С. Экспериментальное исследование кавитационных характеристик сужающихся насадков. — «Инженерно-физический журнал», 1968, т. XIV, № 3, с. 423—429.

Федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение  
высшего образования  
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Политехнический институт

институт

Теплотехника и гидрогазодинамика

кафедра

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой

В. А. Кулагин

подпись      инициалы, фамилия

« 16 » 06. 2018 г.

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Исследование реологических свойств жидкости

тема

13.04.01 Теплоэнергетика и теплотехника

код и наименование направления

13.04.01.01 Энергетика теплотехнологий

код и наименование магистерской программы

Научный руководитель 16.06.18 доцент, канд. физ-мат. наук Е.Б. Истягина

подпись, дата      должность, ученая степень инициалы, фамилия

Выпускник

16.06.18 О.В. Ананин

подпись, дата

инициалы, фамилия

Рецензент

начальник РТС-3 М.Л. Дорошкевич

подпись, дата      должность, ученая степень      инициалы, фамилия

Красноярск 2018